

**PENGARUH VARIASI SAMBUNGAN PADA *CRASH BOX* MULTI
SEGMENT TERHADAP KEMAMPUAN PENYERAPAN ENERGI
DENGAN UJI *QUASI STATIC***

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK MESIN
MINAT MATERIAL MANUFAKTUR**

Ditujukan Untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



HALMAN

NIM. 156060200111001

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

TESIS

PENGARUH VARIASI SAMBUNGAN PADA *CRASH BOX* MULTI SEGMENT TERHADAP KEMAMPUAN PENYERAPAN ENERGI DENGAN UJI *QUASI STATIC*

HALMAN
NIM. 156060200111001

telah dipertahankan di depan penguji pada tanggal.....Desember 2017
dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Magister Teknik

Komisi Pembimbing,

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.
NIP. 197208172000031001

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D.
NIP. 196705181994121001

Malang,.....

Universitas Brawijaya

Fakultas Teknik, Jurusan Mesin
Ketua Program Magister Teknik Mesin

Dr. Eng. Lilis Yulianti, ST., MT.
NIP. 197507022000032001

IDENTITAS TIM PENGUJI TESIS

JUDUL TESIS :

PENGARUH VARIASI SAMBUNGAN PADA *CRASH BOX* MULTI SEGMENT TERHADAP KEMAMPUAN PENYERAPAN ENERGI DENGAN UJI *QUASI STATIC*

Nama Mahasiswa : Halman
NIM : 156060200111001
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Material dan Manufaktur

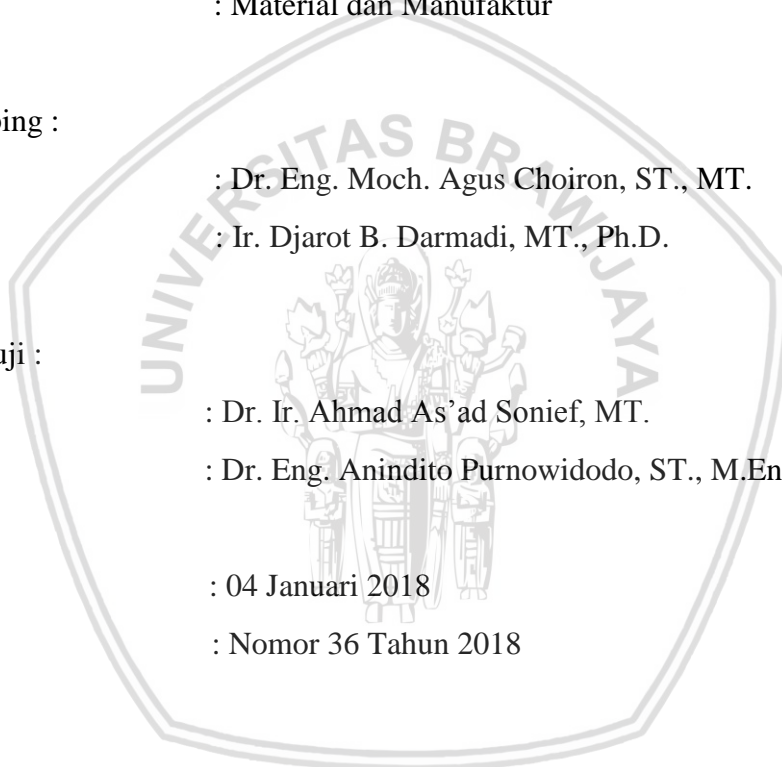
Komisi Pembimbing :

Ketua : Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.
Anggota : Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D.

Tim Dosen Penguji :

Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. Ahmad As'ad Sonief, MT.
Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng

Tanggal Ujian : 04 Januari 2018
SK Penguji : Nomor 36 Tahun 2018





Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Halman, dilahirkan di Sengkang Kabupaten Wajo Propinsi Sulawesi Selatan pada tanggal 06 juni 1967. Anak dari Bapak H. Andi Bachtiar Bin H. Andi Sennang dan Ibu Hj. Andi Sompia Binti Andi Toppo. Menyelesaikan Sekolah Dasar Negeri di Ka'E Ugi pada tahun 1979, pendidikan Sekolah Menengah Pertama di Sengkang pada tahun 1982, pendidikan Sekolah Menengah Atas pada tahun 1985. Menyelesaikan studi Starata satu (S1) dan memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) di Makassar Universitas Hasanuddin Fakultas Teknik Jurusan Mesin pada tahun 1993. Bekerja di salah satu perusahaan industri nasional pada bagian Pembangkit Listrik dan Tenaga Uap pada tahun 1994 - 2004.

Menjadi anggota Dewan Perwakilan Rakyat Daerah (DPRD) Kota Samarinda periode 2004 – 2009. Menjadi tenaga pengajar di PDD Politeknik Negeri Nunukan Oktober 2104 hingga ditugaskan belajar di Universitas Brawijaya Malang Juli 2015.



Malang, Januari 2018

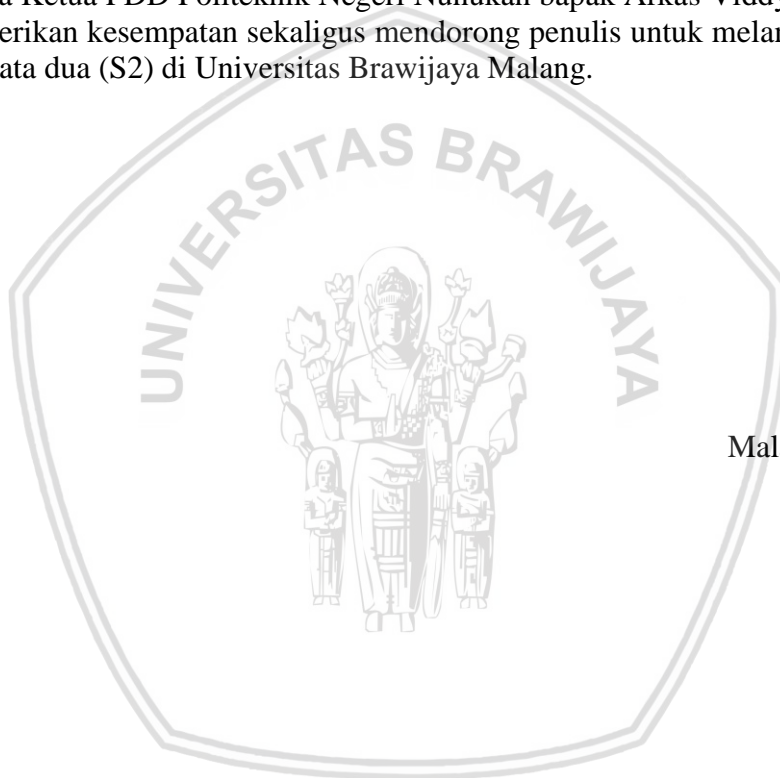
Penulis



Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada : Dr. Eng . Moch. Agus Choiron, ST., MT sebagai pembimbing I dan Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D sebagai pembimbing II yang telah memberikan ilmu, motivasi, dan masukan-masukan selama dalam penulisan tesis ini. Terima kasih pula kepada Rekan-rekan mahasiswa Program Magister angkatan 2014, 2015 dan 2016, para asisten laboratorium Studio Perencanaan dan Rekayasa Sistem Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan teman – teman seperjuangan yang telah memberikan banyak ide, saran dan segala bentuk bantuan dan motivasi yang sangat bermanfaat.

Terima kasih yang tak terhingga pula kepada isteri dan ananda tercinta Siti Dini Savitri dan Andy Dimas Hadinugraha, saudara-saudara kandung saya yang telah memberikan bantuan, dorongan dan do'anya selama dalam studi ini. Tak lupa pula ucapan terima kasih Penulis sampaikan kepada Ketua PDD Politeknik Negeri Nunukan bapak Arkas Viddy, SE., M.M., Ph.D yang telah memberikan kesempatan sekaligus mendorong penulis untuk melanjutkan pendidikan pada jenjang Starata dua (S2) di Universitas Brawijaya Malang.



Malang, Januari 2018

Penulis



Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tesis ini dengan judul “PENGARUH VARIASI SAMBUNGAN PADA *CRASH BOX* MULTI SEGMENT TERHADAP KEMAMPUAN PENEYERAPAN ENERGI DENGAN UJI *QUASI STATIC*” dapat terselesaikan.

Penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung tersusunnya tesis ini hingga dapat terselesaikan dengan baik, terutama kepada :

1. Bapak Moch. Agus Choiron, ST., MT., Dr. Eng., selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan masukan, bimbingan dan arahan selama dalam penyusunan tesis ini.
2. Bapak Djarot B. Darmadi., Ir., MT., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing II yang sama-sama dengan pembimbing 1 telah banyak memberikan masukan, bimbingan dan arahan, termasuk saran hingga tesis ini bisa terselesaikan.
3. Rekan-rekan mahasiswa asisten laboratorium Studio Perencanaan dan Rekayasa Sistem Fakultas Teknik Jurusan Mesin Universitas Brawijaya, utamanya kepada saudara saya Kamaruddin, Ainul Yaqin, Fitra dan rekan-rekan asisten lainnya yang tak dapat penulis sebutkan namanya satu persatu, tak terkecuali pula rekan-rekan mahasiswa Program Sarjana Magister angkatan 2015 dan 2016, yang telah membantu langsung maupun secara tidak langsung dalam penyelesaian tesis ini.
4. Seluruh Staf Administrasi dan Dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
5. Untuk Isteri dan ananda tercinta, ayahanda dan mertua ayahanda almarhum yang berpulang ke rahmatullah disaat tesis ini sementara disusun, saudara-saudara kandung saya yang kesemuanya telah memberikan segala do'a dan dorongan semangat dalam menyelesaikan tesis ini.
6. Bapak Arkas Viddy, S.E., M.M., Ph.D., Ketua PDD Politeknik Negeri Nunukan atas masukan dan dorongannya memberi kesempatan kepada penulis untuk menempuh pendidikan Starta dua (S2) pada Universitas Brawijaya Malang.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, maka dari itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat konstruktif dari seluruh pihak demi sempurnanya tesis ini. Akhir kata semoga tesis ini bermanfaat bagi kita semua, terutama bagi diri pribadi penulis, amin.

Malang, Januari 2018

Penulis



RINGKASAN

Halman, Program Pascasarjana Universitas Brawijaya, juli 2017. Pengaruh Variasi Sambungan pada *Crash box* Multi Segmen Terhadap Kemampuan Penyerapan Energi dengan Uji *Quasi Static*; Pembimbing I, Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT., Pembimbing II, Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D

Dalam dekade terakhir pada tahun 2010 sampai dengan 2014 penggunaan mobil pribadi mengalami peningkatan yang cukup pesat sebesar 9,11 %. Hal ini diikuti pula dengan meningkatnya jumlah kecelakaan yang menyebabkan pengemudi banyak mengalami cedera. Maka dari itu, para teknokrat dituntut agar dapat berinovasi menciptakan atau pun mengembangkan teknologi pengaman yang efisien untuk suatu kendaraan terutama roda empat. Salah satu jenis pengaman yang telah dibuat dan tengah dikembangkan yang diharapkan dapat meminimalisir kerusakan yang timbul akibat kecelakaan terjadi adalah sistem keamanan pasif (*passive safety system*). Jika *bumper* dahulu dirancang berfungsi untuk menahan benturan, maka seiring dengan perkembangan teknologi maka dikembangkanlah suatu fungsi lebih pada *bumper*, agar dapat menahan dan sekaligus dapat meredam benturan. Teknologi tersebut adalah *crash box*.

Crash box merupakan salah satu teknologi keamanan pasif yang didesain untuk mengurangi terjadinya gaya yang terjadi ke seluruh body kendaraan selama mengalami tabrakan. Penelitian telah banyak dilakukan dengan jenis satu segmen, sehingga pengembangan perlu dilakukan terutama penambahan segmen. Pada penelitian ini, jenis *crash box* dua segmen diharapkan dapat menyerap energi lebih optimal, tujuan penambahan segmen itu sendiri agar tegangan terdistribusi secara merata sehingga *buckling* dapat diminimalisir menyebabkan beban kritisnya dapat meningkat.

Eksperimental nyata dengan melalui uji *quasi static* merupakan metode yang digunakan pada penelitian ini. Variabel yang digunakan adalah jenis geometri *crash box* berpenampang lingkaran dengan ketebalan 1,2 mm dan panjang 120 mm, menggunakan material aluminium A6063. Dibuat dalam tiga jenis model sambungan yaitu sambungan 1/4, sambungan 1/3 dan sambungan 1/2. Pada masing-masing ujung sambungan segmen diberikan *chamfer* dengan sudut 45°.

Dari hasil penelitian diperoleh hasil bahwa, struktur kolom mempunyai peranan penting dalam penyerapan energi. *Crash box* yang salah satu segmennya mempunyai kolom panjang nilai penyerapan energinya lebih rendah karena cenderung mengalami *buckling*. Hal ini diperoleh pada *crash box* jenis sambungan 1/3 (3106,027 joule) dan sambungan 1/4 (3886,238 joule), jika dibandingkan dengan *Crash box* sambungan 1/2 merupakan model *crash box* yang mempunyai nilai penyerapan energi tertinggi yakni 5249,726 joule, karena mempunyai panjang segmen 1 dan 2 adalah sama, sehingga tidak ada kolom panjang, menyebabkan beban kritisnya lebih besar dan penyerapan energinya jadi optimal.

Kata Kunci : *Crash box* Multi-Segmen, Uji *Quasi Static*, Penyerapan Energi



SUMMARY

Halman, Post Graduate Program, Universitas Brawijaya, July 2017. The Influence of Connection Variation on Multi-Segment *Crash box* towards Energy Absorption Capabilities with Static-Quasi Test; Supervisor I, Dr. Eng. Moch. Agus Chiron, ST., MT., Supervisor II, Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D

Within the last decade of 2010 until 2014, the use of private cars has increased quite rapidly by 9,11%. This is followed by an increase in the number of accidents that caused the driver to suffer many injuries. Therefore, the technocrats are required to innovate, create, or develop an effective security technology, particularly for a four-wheeled vehicle. One type of security that has been created and is being developed to minimize the damage from an accident is a *passive safety system*. If the bumper was initially designed to withstand an impact, then, along with the development of technology, there is more function to be developed in order to retain and absorb more impact. This technology is called a *crash box*.

Crash box is one of the passive security technology designed to reduce the occurrence of force on the entire body of a vehicle during a crash. Several research has much to do with one type of segment so that further development needs to be done especially in the addition of segment. In this study, the two-segments *crash box* is expected to absorb more optimal power or energy. The purpose of this segment addition is to make the stress or force distributed evenly so that *buckling* can be minimized which caused an increase in the critical load.s

The method used in this study is real experiment through the static-quasi test. The variables used were a geometry-typed *crash box* with a circle cut in a thickness of 1,2 mm and a length of 120 mm and using an A6063 aluminum material. The test was carried out in three types of connection model that is 1/4 connection, 1/3 connection, and 1/2 connection. At each end of the connection, a segment *chamfer* with an angle of 45° is given.

From the results of the research, it showed that the column structure has an important role in energy absorption. One of the segments in the *crash box* that has a long column absorbs lower energy because it tends to undergo the *buckling*. This result is found in the *crash box* type 1/3 connection (3106,027 joules) and 1/4 connection (3886,238 joules). On the other hand, the 1/2 connection type is a *crash box* model that has the highest energy absorption value (5249,726 joules) because the length of the 1 segment (first) and 2 segment (second) is the same. This means that there is no long column which caused larger critical load and that it has optimal energy absorption.

Keywords: Multi-Segment *Crash box*, Static-Quasi Test, Energy Absorption



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR SIMBOL.....	ix
 BAB I PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	 5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 <i>Crash box</i>	7
2.3 Pola Deformasi pada <i>Crash box</i>	9
2.3.1 Pola Deformasi <i>Crash box</i> Berdasarkan Jumlah Sudut.....	9
2.3.2 Pola Deformasi <i>Crash box</i> Berdasarkan Sumbu.....	10
2.4 Pengujian <i>Quasi Static</i>	11
2.5 Aluminium Sebagai Material <i>Crash box</i>	12
2.5.1 Standarisasi Aluminium.....	13
2.5.2 Aluminium Paduan A6063	13
2.6 Tegangan, Regangan, Modulus Elastisitas dan Rasio Poisson.....	14
2.6.1 Tegangan.....	14
2.6.2 Regangan	15
2.6.3 Modulus Elastisitas	16
2.6.4 Rasio Poisson.....	17
2.7 Tekuk (<i>Buckling</i>)	18
2.7.1 Klasifikasi Kesetimbangan Pada Pembebanan <i>Buckling</i>	19
2.7.2 Kategori Kolom	21
2.7.3 Pengaruh <i>Buckling Euler</i> Terhadap Pola Deformasi <i>Crash Box</i>	21
2.8 Energi Serapan.....	22
 BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN.....	 25
3.1 Kerangka Pemikiran	25
3.2 Bagan Aliran	26

3.3	Hipotesis	27
BAB IV METODE PENELITIAN		29
4.1	Tempaat dan Waktu Penelitian	29
4.2	Variabel Penelitian	29
4.2.1	Variabel Bebas	29
4.2.2	Variabel terikat	29
4.2.3	Variabel Terkontrol	30
4.3	Data Material	30
4.4	Spesifikasi Alat Bantu dan Bahan	30
4.4.1	Spesifikasi Alat Bantu	30
4.4.2	Bahan	32
4.4.3	Dimensi Spesimen	33
4.5	Prosedur penelitian	34
4.6	Analisa FEM (<i>Finite Element Methode</i>)	34
4.7	Diagram Alir Penelitian	37
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		39
5.1	<i>Force Reaction</i> Hasil Eksperimen Nyata	39
5.2	Penyerapan Energi Hasil Eksperimen Nyata	41
5.3	Pola Deformasi <i>Crash box</i> Hasil Eksperimen Nyata	42
5.4	<i>Force Reaction</i> Hasil Simulasi Komputer	44
5.5	Kemampuan Penyerapan Energi <i>Crash box</i> Hasil Simulasi Komputer	46
5.6	Pola Deformasi <i>Crash box</i> Hasil Simulasi Komputer	47
5.7	Perbandingan Hasil Eksperimen Nyata dan Simulasi Komputer	49
5.8	Perbandingan Pola Deformasi Hasil Eksperimen Nyata dan Simulasi Komputer	52
5.9	Hasil Simulasi <i>Crash Box</i> Sambungan 2/3 dan 3/4	53
BAB VI PENUTUP		59
6.1	Kesimpulan	59
6.2	Saran	59

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

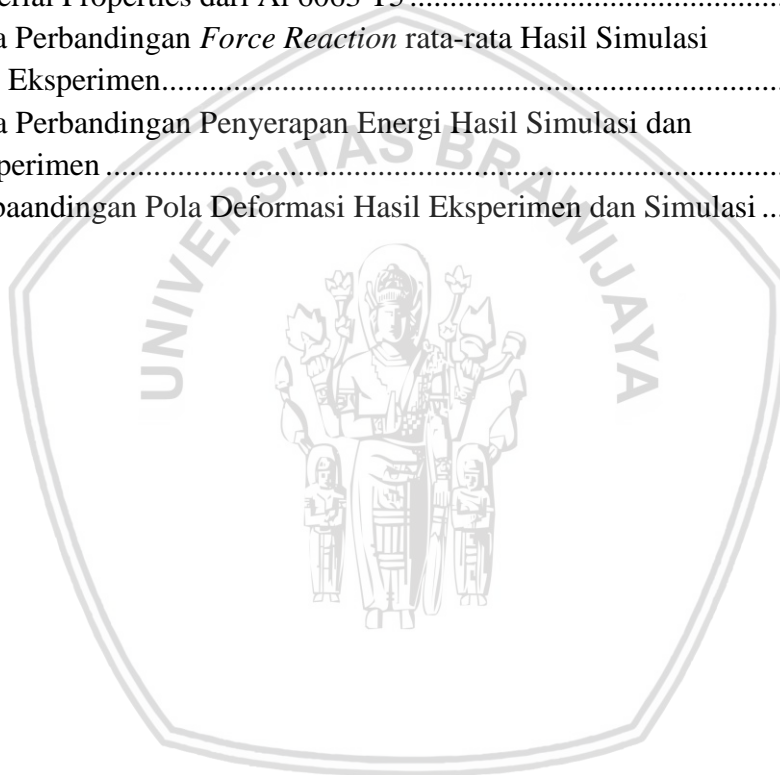
No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	<i>Absorber</i> yang Dipasang Antara Penyangga Dan Rangka Kereta.....	7
2.2	<i>Crash box</i> Dipasang Diantara Rangka dan Bumper Bagian Depan Mobil	8
Gambar 2.3	<i>Crash box</i> Dipasang Diantara Rangka Bumper Bagian Depan Dan Belakang Mobil.....	8
Gambar 2.4	Pola Deformasi <i>Mode Concertina</i>	9
Gambar 2.5	Pola Deformasi <i>Mode Diamond</i>	9
Gambar 2.6	Pola Deformasi <i>Mixed Mode</i>	10
Gambar 2.7	<i>Axial Mode</i>	10
Gambar 2.8	<i>Bending Mode</i>	10
Gambar 2.9	Alat Uji <i>Quasi Static</i>	11
Gambar 2.10	Tegangan Normal Akibat Gaya Pada Material.....	14
Gambar 2.11	Tegangan Geser Pada Material	15
Gambar 2.12	Regangan Akibat Pembebanan	15
Gambar 2.13	Regangan geser Elemen Material	16
Gambar 2.14	Grafik Hubungan Tegangan Dan Regangan Aluminium.....	17
Gambar 2.15	<i>Buckling</i> Karena Pengaruh Tumpuan Pada Struktur Kolom	19
Gambar 2.16	Prilaku Struktur Kolom Berdasarkan Klasifikasi Kesetimbangan.....	19
Gambar 2.17	Prilaku struktur Kolom Ketika Mengalami Pembebanan Secara Aksial	20
Gambar 2.18	Momen Inersia Penampang Lingkaran	21
Gambar 2.19	Pembebanan Axial Pada Batang	22
Gambar 2.20	Grafik hubungan Beban Terhadap Perpindahan	22
Gambar 2.21	Diagram beban – Perpindahan	22
Gambar 2.22	Energi Regangan Elastis Dan Plastis	23
Gambar 2.23	Diagram Beban – Perpindahan Elastis	24
Gambar 3.1	Bagan Aliran Penelitian	27
Gambar 4.1	Aluminium A6063.....	32
Gambar 4.2	Dimensi Spesimen <i>Crash box</i>	33
Gambar 4.3	Permodelan <i>Material Bilinear Isentropic Hardening</i>	36
Gambar 4.4	<i>Boundary Condition Crash box</i>	36
Gambar 4.5	Diagram Alir Penelitian	38
Gambar 5.1	Grafik Hubungan Gaya Pada Setiap Model Sambungan <i>Crash box</i>	39
Gambar 5.2	Penyerapan Energi Pada Masing – Masing Sambungan <i>Crash box</i>	41
Gambar 5.3	Pola Perubahan Deformasi <i>Crash box</i>	43

Gambar 5.4	Pola Deformasi <i>Crash box</i> Pandangan Atas	43
Gambar 5.5	Pola Deformasi <i>Crash box</i> Pandangan Depan	44
Gambar 5.6	Grafik Hubungan <i>Force Reaction</i> Dan <i>Deformation</i> Hasil simulasi	45
Gambar 5.7	Penyerapan Energi Hasil Simulasi Komputer	46
Gambar 5.8	Pola Perubahan Deformasi <i>Crash box</i>	48
Gambar 5.9	Pola Deformasi <i>Crash box</i> Pada <i>Displacement</i> 96,3 mm	48
Gambar 5.10	Force reaction terhadap deformation crash box 2/3 dan 3/4	54
Gambar 5.11	Penyerapan energi pada crash box sambungan 2/3 dan 3/4	55
Gambar 5.12	Pola Deformasi Crash Box (a) Sambungan 2/3 (b) Sambungan 3/4.....	56
Gambar 5.13	Pola Deformasi Tampak Depan dan Atas pada Deformasi 96,3 mm (a) Sambungan 2/3 (b) Sambungan 3/4	57



DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Sistem Penamaan Paduan Aluminium Tempa.....	13
Tabel 4.1	Material Propertis <i>Crash box</i> A6063	30
Tabel 4.2	Material Fisik dan Mekanik <i>Crash box</i> A6063	30
Tabel 4.3	Spesifikasi Alat Bantu	30
Tabel 4.4	Spesifikasi Mesin Kai-Wei	32
Tabel 4.5	Komposisi Bahan Aluminium A6063	32
Tabel 4.6	Hasil Bubutan Spesimen <i>Crash box</i> untuk 2 Segmen	33
Tabel 4.7	Material Properties dari Al 6063 T5	36
Tabel 5.1	Data Perbandingan <i>Force Reaction</i> rata-rata Hasil Simulasi Dan Eksperimen.....	50
Tabel 5.2	Data Perbandingan Penyerapan Energi Hasil Simulasi dan Eksperimen	50
Tabel 5.3	Perbandingan Pola Deformasi Hasil Eksperimen dan Simulasi	52





Halaman ini sengaja di kososngkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kecelakaan kendaraan khususnya pada mobil makin hari makin meningkat, seiring dengan makin meningkatnya pula kebutuhan manusia akan berkendara mobil. Dalam empat tahun terakhir saja, yakni dari tahun 2010 sampai 2014, kebutuhan mobil meningkat dengan pesat dalam setiap tahunnya sebesar 9,11%. Peningkatan ini diikuti pula oleh meningkatnya jumlah kasus kecelakaan lalu lintas dan jumlah korban yang meninggal. Tercatat, pada tahun 2010 sampai 2014 kasus kecelakaan terjadi meningkat 9,59 % pertahunnya dan korban yang meninggal akibat dari kecelakaan tersebut adalah 9,24 % (Badan Pusat statistik. 2015).

Untuk memilih kendaraan mobil, entah dengan merk apa pun, model dan atau pun selera dari pribadi pemiliknya dan penumpang yang akan mengendarai mobil tersebut, terdapat salah satu aspek prioritas yang menjadi titik perhatian yaitu teknologi sistem keselamatan (*safety technology*). Pada dasarnya, sistem keselamatan pada mobil di bagi atas sistem keselamatan aktif (*active safety*) dan sistem keselamatan pasif (*passive safety*). Sistem teknologi yang terdapat pada suatu mobil berfungsi untuk mencegah terjadinya kecelakaan disebut sebagai sistem keselamatan aktif. Sedangkan, kecelakaan yang tidak bisa lagi dihindarkan, ketika sistem keselamatan aktif sudah tidak mampu lagi mencegah terjadinya kecelakaan, maka sistem inilah yang bekerja dan disebut sebagai sistem keselamatan pasif. Sistem keselamatan pasif ini ditujukan untuk mengurangi atau meminimalisir cedera atau pun luka-luka yang dapat dialami oleh sopir dan penumpang lainnya (Putra, I Putu Ali. 2014).

Crash box merupakan salah satu teknologi sistem keselamatan pasif yang akhir-akhir ini banyak diteliti, karena fungsinya adalah untuk menyerap energi kinetik pada saat mobil tersebut mengalami benturan ketika terjadi kecelakaan, baik benturan dari depan maupun dari belakang. Perangkat komponen *crash box* didesain untuk mengurangi terjadinya gaya yang terjadi ke seluruh struktur kendaraan selama mengalami tabrakan. Karena itu, perangkat *crash box* di pasang diantara penyangga dan rangka kendaraan, karena fungsinya sebagai komponen yang ditujukan untuk menyerap energi. Makin tinggi daya serap energi oleh *crash box*, makin kecil pula kemungkinan mobil tersebut mengalami kerusakan fatal sehingga pengemudi maupun penumpang lainnya makin aman dari cedera yang dapat dialaminya akibat tabrakan yang dialami mobil tersebut.

Berdasarkan penelitian oleh Velmurugan dan Muralikannan (2009) yang meneliti tentang karakteristik *crash box* untuk menyerap energi dengan beragam bentuk penampang antara lain lingkaran (*circle*), dan persegi empat panjang (*rectangular*), serta persegi empat kotak (*square*) ternyata ditemukan penyerapan energi terbesar justru ditemukan pada *crash box* jenis penampang lingkaran (*circle*).

Beberapa penelitian sudah dilaksanakan pada *crash box* dengan kecepatan tumbukan yang telah ditentukan terjadi adanya perubahan deformasi plastis. Hal ini menunjukkan terjadinya penyerapan energi pada *crash box* tersebut. Akan tetapi di peroleh fenomena bahwa, makin cepat perubahan deformasi plastis pada *crash box*, maka sisa kecepatan akibat tumbukan masih tersisa tinggi. Dan hal ini, masih dapat membahayakan rangka utama kendaraan, sehingga keamanan bagi pengemudi maupun penumpang lainnya dianggap masih rendah (Awali, Jatmiko. 2014). Maka dari itu, penelitian lebih lanjut dapat dikembangkan dengan menambahkan segmen pada *crash box*, dengan tujuan untuk mengurangi fenomena *buckling* yang terjadi dan dengan harapan agar batas beban kritis pada *crash box* semakin besar sehingga *crash box* dapat pula menerima beban tumbukan yang lebih tinggi dengan serapan energi yang semakin meningkat.

Tanaskovic, J., Milkovic, D., Lucanin, V., Vasic, Franklin (2014) dalam penelitiannya tentang *crash box* yang terdiri dari dua segmen yang meneliti jenis serapan energi kinetik yang bekerja akibat tabrakan. Serapan energi oleh deformasi plastis dan melalui gesekan antara tabung dan penyambung merupakan prinsip utama yang terjadi pada *crash box* dua segmen.

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, diperoleh bahwa, kemampuan penyerapan energi terbesar diantara jenis *crash box* yang telah diteliti adalah *crash box* jenis lingkaran (*circle*). Maka dari itu, pada penelitian ini akan dilakukan pengujian secara eksperimental nyata dengan menguji jenis *crash box* yang berpenampang lingkaran. Dan untuk meminimalisir terjadinya *buckling*, *crash box* dibuat multi segmen agar tegangan dapat terdistribusi secara merata sehingga kemampuannya untuk menyerap energi dapat lebih optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Bertitiktolak pada latar belakang yang sudah dikemukakan dalam uraian tersebut di atas, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan, yaitu bagaimanakah pengaruh variasi sambungan pada *crash box* multi segmen penampang lingkaran terhadap kemampuan untuk menyerap energi dengan melalui uji *quasi static*.

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini dibatasi oleh batasan - batasan masalah agar permasalahan tidak meluas. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini, antara lain :

1. Material *crash box* yang digunakan adalah aluminium A6063.
2. Penelitian difokuskan kepada kemampuan *crash box* untuk menyerap energi dengan uji *quasi static* melalui eksperimen nyata menggunakan mesin uji tekan.
3. *Crash box* yang diuji adalah jenis lingkaran (*circle*) terdiri atas 2 segmen, dimana lokasi sambungan segmen 1 dan segmen 2 divariasi dalam 3 model, yaitu sambungan 1/4, sambungan 1/3, dan sambungan 1/2, dari total panjang (segmen 1 + segmen 2) 120 mm.
4. Pada titik temu dari kedua lokasi ujung segmen *crash box* diberikan *chamfer* dengan sudut $\pm 45^\circ$.
5. Tebal dinding *crash box* masing-masing segmen (t_1) dan (t_2) sama $\pm 1,2$ mm.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini ditujukan untuk mencapai hal-hal sebagai berikut :

1. Untuk meneliti sebesar apakah pengaruh posisi letak sambungan pada *crash box* multi segmen untuk menyerap energi.
2. Untuk mengetahui jenis lokasi variasi sambungan yang terbaik untuk memiliki nilai penyerapan energi tertinggi diantara 3 model lokasi variasi sambungan yang diteliti, yaitu: sambungan 1/4, sambungan 1/3 dan sambungan 1/2 dari total panjang *crash box* 120 mm.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun sebagai manfaat yang diharapkan dari penelitian ini, antara lain :

1. Untuk pengembangan dan penerapan ilmu dan teori baik dalam perkuliahan maupun dalam praktek agar *crash box* ini dapat diterapkan sebagai teknologi keamanan pasif pada mobil atau pun kendaraan lainnya seperti kereta dll.
2. Dapat dimanfaatkan sebagai dasar literatur pembandingan untuk penelitian selanjutnya.



Halaman ini sengaja di kosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam penelitian secara eksperimental melalui pengujian *static* dan dinamik yang telah dilakukan oleh Velmurugan dan Muralikannan (2009), tentang *crash box* satu segmen, dengan dimensi (tinggi, keliling dan tebal) masing-masing *crash box* sama dan ternyata bahwa, serapan energi terbesar justru didapatkan dari *crash box* berpenampang lingkaran dengan jumlah serapan energinya adalah 3925,2 joule. Dibandingkan dengan jenis *crash box* lainnya dalam penelitian yang sama yaitu *crash box* jenis persegi diperoleh serapan energi 3428,9 joule dan yang persegi panjang 2952,5 joule.

Choiron, Moch. Agus., Darmadi Djarot B dan Anwari, Bintang Rahmaddian (2015), dalam penelitiannya tentang pengaruh variasi sudut tirus dinding *crash box* berpenampang lingkaran (*circular*) terhadap pola deformasi dan penyerapan energi pada uji simulasi tabrakan arah frontal. Dalam penelitian tersebut menggunakan variasi *crash box* dengan sudut tirus (α) $0,2^\circ$; $0,4^\circ$; $0,6^\circ$; $0,8^\circ$ dan $1,0^\circ$, dan material *crash box* dari bahan baja AISI 1340. Dalam hasil penelitian, diperoleh pola deformasi *mode concertina* dan campuran (*concertina* + *diamond*) dimana pengaruh sudut tirus terhadap energi yang diserap oleh *crash box* kecenderungannya adalah semakin besar sudut tirus dinding *crash box* cenderung semakin besar pula energi yang mampu untuk diserapnya. Serapan energi terbesar adalah 10823 J pada *crash box* dengan sudut tirus (α) $1,0^\circ$

Asroni., Choiron, Moch. Agus., dan Purnowidodo, Anindito (2014), dalam penelitiannya melalui simulasi komputer yang meneliti tentang pengaruh *crash box* berbentuk tabung 2 segmen terhadap kemampuan menyerap energi dampak diperoleh hasil bahwa, energi yang diserap oleh *crash box* cenderung naik secara signifikan. Hal ini disebabkan karena tabung 2 mempunyai tebal yang lebih besar dari pada tabung segmen 1. Hal mana, semakin tebal tabung maka momen inersia pun juga semakin besar. Karena itu, energi yang diserap pun juga semakin besar pula. Hal yang membedakan dengan *crash box* 1 segmen, dimana sejak awal hingga akhir energi yang diserap kenaikannya konstan dan nilainya pun lebih rendah dari pada *crash box* yang dua segmen.

Choiron, Moch. Agus., Purnowidodo, Anindito., Siswanto, Eko dan Hidayati, Nafisah Arina (2015), meneliti tentang karakteristik *crash box* multi segmen untuk menyerap energi tubrukan melalui simulasi komputer. Pada penelitian tersebut diperoleh bahwa, pengaruh terjadinya buckling yang sangat kecil disertai dengan meningkatnya momen inersia menyebabkan diperolehnya *crash box* segmenn 3 memiliki kemampuan

untuk menyerap energi yang lebih baik dengan nilai penyerapan energi tertinggi daripada crash box 2 segmen apalagi *crash box* yang hanya memiliki 1 segmen saja.

Tanaskovic, J., Milkovic, D., Lucanin, V., dan Vasic, Franklin (2014) dalam penelitiannya secara eksperimental melalui uji *quasi static* pada tabung dua segmen. Bahan dari tabung masing-masing segmen berbeda, dibuat dari bahan aluminium dan baja ringan. Demikian pula tebal dinding dan panjang masing-masing segmen juga berbeda. Pada kedua ujung tabung yang bersambungan tersebut diberikan *chamfer* dengan tujuan agar tabung dapat terdorong masuk secara mulus memasuki segmen tabung berikutnya ketika terjadi pembebanan atau tabrakan pada mobil atau kereta. Penyerapan energi pada tabung sistem dua segmen bekerja pada prinsipnya menusuk dan membelah tabung penampang melingkar, sehingga diperoleh hasil yang menunjukkan terjadinya kombinasi penyerapan energi yaitu secara deformasi plastis dan melalui gesekan antar tabung. Dengan sistem kombinasi penyerapan energi, daya serap energi sekitar 60 % lebih tinggi dari pada penyerapan energi melalui proses *shrinking*. Dari hasil penelitian tersebut diperoleh penyerapan energi dari proses kombinasi *Snking and splitting* ('*combined phase*') adalah rata-rata 11,52 kJ (11.520 joule) dan untuk penyerapan energi yang prosesnya shrinkin-only nilai penyerapan energinya hanya 7,64 kJ (7640 joule).

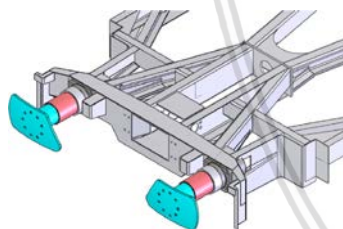
Choiron, Moch Agus., Sudjito dan Hidayati, Nafisah Arina (2016) dalam penelitiannya menggunakan simulasi komputer, meneliti tentang karakteristik *crash box* 2 segmen berlubang terhadap kemampuannya untuk menyerap energi tubrukan frontal. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh bahwa, *crash box* dengan 2 lubang merupakan variasi yang memiliki kemampuan untuk menyerap energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan variasi *crash box* 4 lubang. Dan nilai penyerapan energi tertinggi diperoleh pada variasi jarak 3/4 dengan nilai penyerapan energi sebesar 10.179,98 joule, disusul kemudian jarak 1/2 dan paling rendah adalah variasi pada jarak 1/4 dengan variasi lubang adalah 4.

Untuk mendukung hasil penelitian sebelumnya, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan mengembangkan dan membandingkan penelitian-penelitian yang telah ada sebelumnya. Penelitian lebih lanjut dipilih dengan membuat *crash box* dua segmen berpenampang lingkaran (*circle*) yang terbuat dari bahan yang sama dari masing-masing segmen dengan bahan dari aluminium A6063. Sambungan setiap segmen akan dibedakan dalam 3 model yang bervariasi. Hal ini ditujukan untuk mengetahui salah satu diantara model tersebut yang terbaik untuk menyerap energi. Diameter pada kedua segmen tabung adalah sama dengan ujung masing-masing kedua segmen tabung diberikan *chamfer* dengan sudut $\pm 45^\circ$, ditujukan agar proses penetrasi tabung dapat berlangsung mulus, tidak kaku

sehingga tidak mudah robek pada saat pembebanan aksial, agar kemampuan untuk menyerap energi dapat diperoleh lebih besar melalui gesekan dan deformasi plastis tanpa atau lebih sedikit mengalami *buckling*.

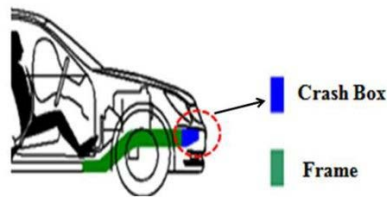
2.2 *Crash box*

Crash box merupakan salah satu komponen dari perangkat sistem keamanan pasif (*passive safety system*) pada kendaraan khususnya pada mobil atau kereta api. Sistem keselamatan pasif pada kendaraan akan bekerja ketika kecelakaan sudah tidak dapat lagi terhindarkan. Ketika sistem keselamatan aktif sudah tidak mampu lagi mencegah terjadinya kecelakaan maka sistem ini akan mulai diaktifkan. Fungsi alat ini adalah untuk mengurangi atau meminimalisir cedera maupun luka-luka yang mungkin dialami oleh pengemudi maupun penumpang di dalam kendaraan tersebut. Selain berfungsi pula untuk mencegah terjadinya kerusakan fatal pada bagian kendaraan yang vital akibat tabrakan frontal. Bahkan pada pengembangannya, *crash box* ini dikembangkan untuk didesain pada kereta api, perannya adalah sebagai *absorber* untuk menyerap sebanyak mungkin energi kinetik selama tabrakan dengan dikendalikan oleh deformasi elemen dan mengurangi gaya yang diterapkan keseluruh struktur kendaraan. Gambar 2.1 menunjukkan tempat pemasangan *crash box* sebagai *absorber* pada rangka kereta api.

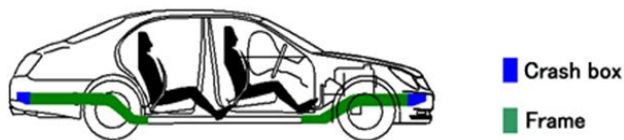


Gambar 2.1 *Absorber* Yang Dipasang Antara Penyangga Dan Rangka Kereta
Sumber: Tanaskovic, J dkk (2015)

Karena perannya sebagai *absorber* untuk mereduksi energi tumbukan, dimana pertama-tama yang menerima efek dari tumbukan akibat tabrakan tersebut adalah *bumper*, oleh sebab itu *crash box* pada umumnya didesain untuk dipasang di depan dan atau di belakang pada bagian antara *bumper* dan rangka kendaraan. Gambar (2.2) dan (2.3) menunjukkan penempatan *crash box* yang dipasang pada bagian depan dan atau di depan dan di belakang antara *bumper* dan rangka mobil.



Gambar 2.2 *Crash box* Dipasang Di antara Rangka Dan *Bumper* Bagian Depan Mobil
Sumber : Nasir Hussain, N dkk (2017)



Gambar 2.3 *Crash box* Dipasang Diantara Rangka *Bumper* Bagian Depan dan Belakang Mobil
Sumber : Sumitomo (2005)

Tujuan penempatan *crash box* pada lokasi antara *bumper* dan rangka kendaraan, yaitu ketika terjadi kecelakaan baik dari depan maupun dari belakang, maka *crash box* akan menyerap energi melalui deformasi plastis dengan menurunkan gaya maksimal kendaraan penubruk untuk selanjutnya gaya-gaya tersebut didistribusikan secara merata sehingga meminimalisir daya dari energi tumbukan yang akan diterima oleh pengemudi maupun penumpang lainnya di dalam kendaraan tersebut. Salah satu kekurangan utama dari *crash box* adalah ruang yang relatif besar diperlukan di ruang yang terbatas tersedia di depan maupun di belakaang suatu kendaraan. Karena itu, untuk mendapatkan keamanan yang optimal, ada beberapa kriteria yang perlu diperhatikan sebagai syarat utama suatu *crash box*, antara lain :

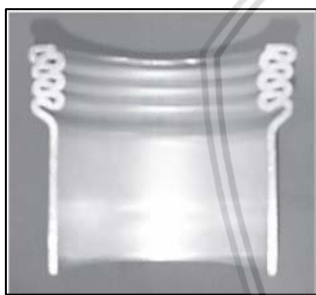
1. *Crash box* merupakan komponen peralatan sekali pakai sehingga harus mudah untuk diproduksi serta mudah untuk dipasang maupun dilepaskan, dan memiliki biaya yang relatif rendah.
2. Energi tumbukan sebagai akibat benturan dari tabrakan, harus sebesar mungkin dapat diserap dan selanjutnya didistribusikan menjadi deformasi irreversible, yaitu energi tabraknya diubah menjadi deformasi plastis.
3. Besar energi diserap sedapat mungkin maksimal, karena itu diameter *crash box* harus cukup besar dan cukup panjang sehingga jalur deformasi untuk penyerapan energi tabraknya semakin besar dan panjang pula, tetapi tidak mengambil ruang yang terlalu banyak karena terbatasnya ruang pada bagian antara *bumper* dan rangka kendaraan, baik pada bagian depan maupun pada bagian belakang.

2.3 Pola Deformasi Pada *Crash box*

Dalam manajemen energi kecelakaan suatu kendaraan, terdapat dua pertimbangan utama di dalam mendisain suatu struktur otomotif yaitu, penyerapan energi kinetik kendaraan dan kekuatan untuk mempertahankan bentuk akibat tumbukan dan atau menjaga penumpang agar tetap aman dan selamat saat terjadi kecelakaan. Menurut pola deformasi yang terjadi pada *crash box*, terdapat dua yaitu, pola deformasi berdasarkan jumlah sudut dan pola deformasi berdasarkan sumbu.

2.3.1 Pola Deformasi *Crash box* Berdasarkan Jumlah Sudut

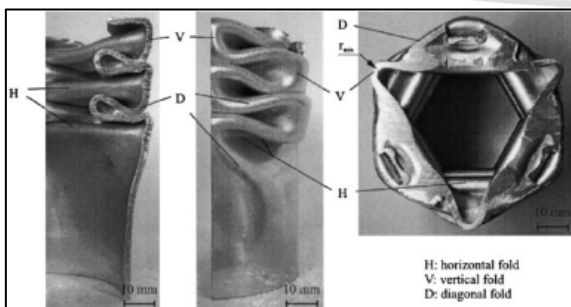
Secara umum, pola deformasi pada *crash box* menurut jumlah sudut, terjadi dalam tiga mode yaitu mode concertina atau aksisimetris (*axisymmetric*), *mode diamond* dan *mixed mode (axisymmetric-diamond)*. Lipatan dengan bentuk simetris yang terjadi pada *crash box* disebut sebagai *mode concertina*. Gambar 2.4 menunjukkan pola deformasi *mode concertina*.



Gambar 2.4 Pola Deformasi *Mode Concertina*

Sumber : Toksoy, A.K (2009:33)

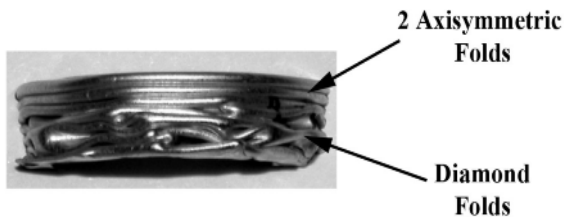
Sedangkan pola yang terbentuk dengan lipatan-lipatan transversal dan longitudinal disebut sebagai *mode diamond*. Gambar 2.5 menunjukkan pola deformasi berbentuk *mode diamond*



Gambar 2.5 Pola Deformasi *Mode Diamond*

Sumber : Toksoy, A.K (2009:33)

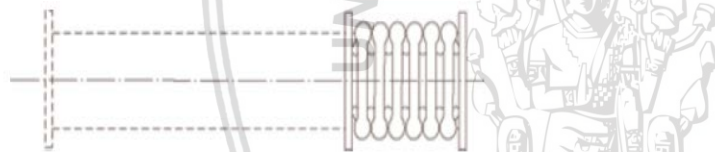
Dan *mixed mode* adalah, ketika terjadi lipatan campuran antara *mode concertina* dan *mode diamond*. Hal ini terjadi biasanya didahului dengan lipatan *concertina* kemudian disusul pola berbentuk *diamond*. Gambar 2.6 menunjukkan pola deformasi *mixed mode*.



Gambar 2.6 Pola Deformasi *Mixed Mode*
Sumber : Toksoy, A.K (2009:33)

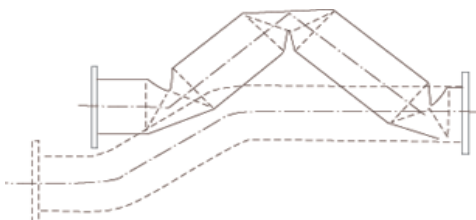
2.3.2 Pola Deformasi *Crash box* berdasarkan sumbu

Penyerapan energi untuk pola deformasi *crash box* berdasarkan sumbu terdapat dua mekanisme dasar untuk mendapatkan deformasi pada *crash box*, yaitu dengan *axial mode* dan *bending mode*. *Axial mode* terjadi biasanya pada kondisi tumbukan dari arah depan atau dari belakang (*Frontal/rear*) dari kendaraan atau tumbukan dengan arah sudut sekitar $5^{\circ} - 10^{\circ}$. Gambar jenis *axial mode* ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 *Axial mode*
Sumber : Paul, P. dkk (2004:42)

Sedangkan *bending mode* mekanisme pembentukan deformasinya melibatkan mekanisme pembentukan sendi lokal dengan energi serapan yang lebih rendah. Kecenderungan untuk terdeformasi pada sendinya merupakan ciri struktur *front-end*, bahkan struktur yang dirancang agar terdeformasi secara aksial cenderung gagal, kecuali mengikuti aturan yang sangat spesifik untuk meningkatkan stabilitas dan ketahanan terhadap sudut pembebanan. Gambar 2.8 menunjukkan tentang mekanisme *bending mode*.

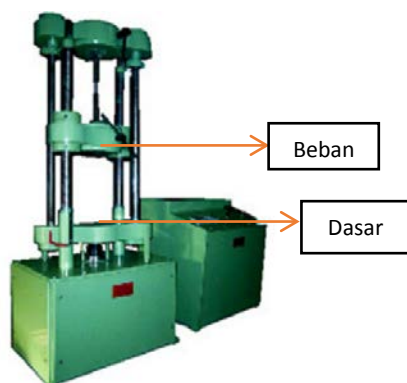


Gambar 2.8 *Bending Mode*
Sumber : Paul, P. dkk (2004:43)

Untuk mendapatkan serapan energi maksimal, maka pola deformasi yang diharapkan dapat terjadi pada saat *crash box* mengalami beban tumbukan disaat kendaraan mengalami tabrakan adalah *axial mode*. Han (1999) dalam penelitiannya terhadap pola deformasi struktur ber dinding tipis yang mengalami pembebanan dengan arah tumbukan yang miring menghasilkan bahwa, *bending mode* yang mendominasi pola deformasi yang terjadi pada *crash box* bilamana sudut kemiringan beban terjadi pada sudut kemiringan di atas 8° , sementara jumlah energi yang diserap oleh *crash box* justru berkurang sampai mencapai 40% dari *crash box* yang terdeformasi secara aksial.

2.4 Pengujian *Quasi static*

Pengujian *quasi static* merupakan salah satu jenis uji tekan yang bersifat destruktif yang digunakan untuk menguji kemampuan suatu *crash box* dalam menyerap energi. Dalam pengujian, beban dan atau *displacement* dilakukan dengan kecepatan yang lambat dan laju regangan yang sangat rendah. Hal yang membedakan dengan *dynamic test* adalah *dynamic test* diberikan beban dinamis, dimana pembebanannya diterapkan dengan kecepatan yang tinggi sehingga dapat menyebabkan struktur bergetar dan gaya inersia cukup besar. Kecepatan yang lambat pada uji *quasi static* memiliki keuntungan yaitu untuk memberikan gambaran mengenai perilaku struktur yang diuji setelah terjadinya tegangan *yield*. Tes *quasi static* ini biasanya dilakukan untuk mempelajari kinerja struktural dari suatu struktur dan bidang struktur lainnya, seperti tingkat propagasi retak, *hierarchy of collapse* dan tingkat kerusakan dari suatu struktur dan lain-lain. Prosedur pengujian *crash box* adalah dengan cara *crash box* yang akan diuji diletakkan di dasar mesin uji dengan tumpuan baja dan selanjutnya *crash box* diberi beban melalui beban kompresi aksial dengan laju kecepatan pembebanan adalah sekitar 10-60 mm/menit (Sohn dkk, 2007). Gambar 2.9 menunjukkan alat uji *quasi static*.



Gambar 2.9 Alat Uji *Quasi static*

Sumber : <https://www.indiamart.com/universaltesting-machine-kolkata/universal-testing-machines.html>

2.5 Aluminium Sebagai Material *Crash box*

Aluminium merupakan salah satu unsur logam yang banyak terkandung di bumi. Ditemukan pertama kali pada tahun 1827 oleh Friedrich Wohler, seorang pakar dalam ilmu kimia berkebangsaan Jerman. Aluminium dalam bentuk senyawa kimia disebut pula sebagai bauksit merupakan biji aluminium yang terdiri atas tanah tawas, aluminium oksida, besi oksida dan asam silikat. Aluminium termasuk salah satu jenis logam yang penggunaannya paling banyak digunakan setelah besi. Selain karena jumlahnya yang terdapat banyak melimpah di alam, aluminium pun memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan besi maupun dengan logam lainnya. Aluminium termasuk logam yang ringan dan mempunyai kekuatan yang tinggi, tahan terhadap korosi, dan merupakan pengantar listrik yang baik (Wirjosumarto : 2000 : 113). Aluminium memiliki karakteristik utama yaitu ringan dengan berat jenis adalah $2,7 \text{ gr/cm}^3$ dan dengan nilai keuletan yang tinggi serta dengan kemampuan permesinan yang baik. Secara ekonomi pun aluminium cukup murah sejak ditemukannya proses elektrolisis sejak tahun 1886 oleh Charles Martin Hall dari Amerika dan Paul L.T Heroult dari Perancis (1863-1914). Dibandingkan dengan proses kimia Wohler pada tahun 1827, proses ini sangat tidak ekonomis dan harga aluminium dulunya sebelum proses elektrolisis ditemukan sangat mahal melebihi harga dari emas, karena dulu dianggap sebagai logam berharga dan hanya dapat diperoleh dari bauksit dengan proses kimia Wohler. Karena sifat-sifat yang dimiliki sedemikian tersebut, baik ditinjau secara teknik maupun ekonomi cukup murah dan ketersediaan sangat melimpah, karena itu aluminium banyak digunakan secara luas dalam pabrikan. Aplikasi penggunaan aluminium sangat luas, dan umumnya hampir semua industri rumah tangga maupun pabrikan lainnya banyak menggunakan aluminium ini sebagai bahan dasar utamanya, sebagai contoh automotif, kapal laut, pesawat terbang dan konstruksi, termasuk pula dalam pembuatan *crash box* sebagai alat peredam energi, aluminium cukup memenuhi kriteria sebagai syarat utama dari suatu *crash box*. Dari sekian banyak model *crash box* hasil uji percobaan, kini tinggal 3 atau 4 *crash box* unggulan yang siap dibuat oleh pabrik komponen atau dipakai nantinya oleh pabrikan mobil. Wujud ragamnya adalah menyerupai pelat yang dibentuk mirip dengan balok dengan satu dan dua dinding, segi enam dan juga lingkaran. Pelatnya semua terbuat dari bahan dasar aluminium atau baja ringan sebagai pilihan pemakainya (Tatacipta Dirgantara : Tempo.co. 2015).

2.5.1 Standarisasi Aluminium

Untuk memperbaiki sifat mekanis dari bahan logam aluminium, bahan aluminium ditambah unsur-unsur paduan. Unsur-unsur paduan tersebut dapat berupa tembaga

(copper), mangan (*manganese*), silicon, magnesium, magnesium dan silicon, dan seng (zinc). Standarisasi aluminium digunakan untuk menggolongkan logam dari aluminium paduan berdasarkan pada komposisi kandungan unsur-unsur kimianya. Penetapan standarisasi logam aluminium menurut *American Society For Testing and Materials* (ASTM) mempergunakan sistem empat digit angka dalam mengidentifikasi dan menetapkan penggolongan aluminium dan paduan aluminium. Adapun cara-cara penggolongan aluminium dan paduan aluminium tersebut, menurut ASTM dapat dilihat dalam tabel 2.1 sebagai berikut :

Tabel 2.1 Sistem Penamaan Paduan Aluminium Tempa

<i>Primary Alloying Element</i>	<i>Series Number</i>	<i>Relative Corrosion Resistance</i>	<i>Relative Strength</i>	<i>Heat Treatment</i>
Aluminium, 99% dan lebih besar	1xxx	<i>Excellent</i>	<i>Fair</i>	<i>Non-Heat-Treatable</i>
Copper	2xxx	<i>Fair</i>	<i>Excellent</i>	<i>Heat-Treatable</i>
Manganese	3xxx	<i>Good</i>	<i>Fair</i>	<i>Heat-Treatable</i>
Silicon	4xxx	-	-	<i>Varies by Alloy</i>
Magnesium	5xxx	<i>Good</i>	<i>Good</i>	<i>Non-Heat-Treatable</i>
Magnesium dan Silicon	6xxx	<i>Good</i>	<i>Good</i>	<i>Heat-Treatable</i>
Zinc	7xxx	<i>Fair</i>	<i>Excellent</i>	<i>Heat-Treatable</i>

Sumber : (Kissel, J.R. 2002 : 14)

2.5.2 Aluminium Paduan A6063

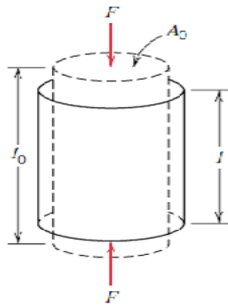
Pada penelitian tentang *crash box* ini, material aluminium yang digunakan adalah aluminium paduan jenis magnesium dan silicon (6xxx : Tabel 2.1). Aluminium paduan dalam seri ini memiliki kekuatan kurang sebagai bahan tempaan jika dibandingkan dengan paduan-paduan lainnya. Tetapi aluminium paduan ini sangat baik untuk mampu bentuk yang tinggi dalam temperatur biasa. Memiliki mampu bentuk yang baik pada ekstrusi dan tahan korosi, dapat diperkuat dengan melalui perlakuan panas untuk meningkatkan kekerasan dan kekuatan tensil yang cukup besar setelah pengerjaan (Surdia :1999 : 40). Adapun sifat-sifat fisik dan sifat-sifat mekanikal Aluminium Paduan A6063 dapat dilihat pada tabel 4.1 dan 4.2.

2.6 Tegangan, Regangan, Modulus Elastisitas dan Rasio Poisson

2.6.1 Tegangan

Perubahan bentuk dan ukuran dari suatu benda bergantung pada arah dan letak gaya luar yang diberikan pada benda tersebut. Terdapat beberapa jenis deformasi yang bergantung pada sifat elastisitas suatu benda, antara lain tegangan (*stress*) dan regangan

(*strain*). Pada umumnya tegangan dibagi menjadi dua yakni tegangan normal yaitu, tegangan yang disebabkan oleh gaya yang bekerja tegak lurus terhadap luas permukaan benda tersebut. Ilustrasi gaya digambarkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Tegangan Normal Akibat Gaya pada Material
Sumber : Callister and William (2001 :150).

Pada gambar 2.10 menunjukkan sebuah benda elastis dengan panjang l_0 dan luas penampang A diberikan gaya F sehingga bertambah pendek l . Dalam keadaan seperti ini benda tersebut dikatakan mengalami tegangan. Tegangan menunjukkan kekuatan gaya yang menyebabkan perubahan bentuk suatu benda. Tegangan didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya yang bekerja pada suatu benda dengan luas penampang benda tersebut. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

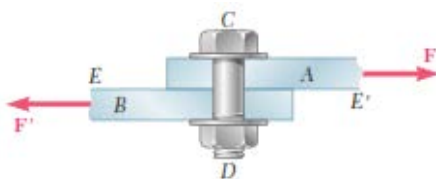
dengan :

σ = Tegangan Normal (Pa)

F = Gaya normal (N)

A = Luas penampang dimana gaya bekerja (m^2)

Selanjutnya, tegangan geser yaitu tegangan yang terjadi disebabkan oleh adanya gaya yang bekerja searah dengan luas permukaan benda tersebut. Tegangan geser diilustrasikan dalam gambar 2.11



$$\tau = \frac{F_s}{A} \quad (2.2)$$

dengan :

τ = Tegangan Geser (N/m²)

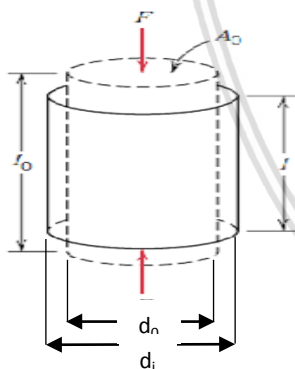
F_s = Gaya geser (N)

A = Luas permukaan benda dimana gaya bekerja (m²)

Tujuan utama dari analisis suatu tegangan adalah untuk menentukan tegangan dan regangan internal suatu bahan, mengetahui deformasi dan refleksi yang dialami oleh suatu benda serta untuk memperoleh solusi dari permasalahan dinamika dari suatu struktur.

2.6.2 Regangan

Bilamana suatu benda diberi gaya, maka pada benda tersebut akan terjadi tegangan pada bagian elemen-elemen benda tersebut. Tegangan yang terjadi pada benda tersebut akan menimbulkan regangan. Sedangkan regangan didefinisikan sebagai perbandingan antara perubahan panjang dengan panjang mula-mula benda tersebut. Sebagaimana halnya dengan tegangan, regangan pun dibagi atas dua hal yang sama yaitu regangan normal dan regangan geser. Gambar 2.12 menunjukkan ilustrasi regangan normal yang terjadi pada suatu benda.



Gambar 2.12 Regangan Akibat Pembebanan
Sumber : Callister and William (2001 :159)

Secara matematis, regangan normal dapat dituliskan sebagai berikut :

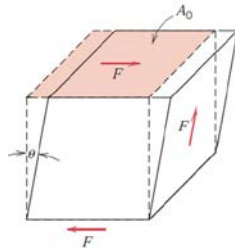
$$\varepsilon = \frac{L_i}{L_o} \quad (2.3)$$

dengan : ε = Regangan normal

L_i = Perubahan panjang (m)

L_o = Panjang mula-mula benda (m)

Sedangkan regangan geser adalah perubahan sudut antara dua permukaan tegak lurus dari elemen diferensial suatu benda. Secara ilustrasi regangan geser dapat dilihat pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Regangan Geser Elemen Material
Sumber : Callister and William (2001 :150)

Secara matematis regangan geser dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\gamma = \frac{S_s}{S_o} \quad (2.4)$$

dengan :

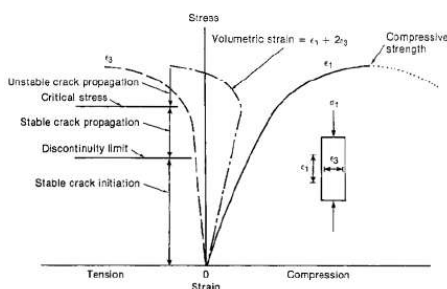
γ = Regangan geser

S_s = Perubahan sudut ($^{\circ}$)

S_o = Sudut awal ($^{\circ}$)

2.6.3 Modulus Elastisitas

Selama gaya yang bekerja pada benda elastis tidak melampaui batas elastisitasnya maka perbandingan antara tegangan (σ) dan regangan (γ) adalah konstan. Bilangan konstanta tersebut dinamakan modulus elastisitas atau *Modulus Young* (E). Jadi, modulus elastisitas atau *Modulus Young* mempunyai perbandingan antara tegangan dan regangan yang dialami suatu benda. Hubungan antara tegangan dan regangan diperlihatkan dalam gambar kurva tegangan dan regangan seperti pada gambar 2.14 .



Gambar 2.14 Grafik hubungan tegangan dan regangan aluminium

Sumber http://home.iitk.ac.in/~sangals/virtualLab/mechanicalTestingExperiments/engineering_Curve.html.

Secara matematis modulus elastisitas dan kekakuan dapat dituliskan sebagai berikut :

Modulus Elastistas / Modulus Young

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

dengan :

E = Modulus elastisitas (N/m^2)

σ = Tegangan (N/m^2)

ε = Regangan

Modulus Kekakuan

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.6)$$

dengan :

G = Modulus kekakuan (N/m^2)

τ = Tegangan geser (N/m^2)

γ = Regangan geser

2.6.4 Rasio Poisson

Suatu benda yang mengalami pembebanan secara aksial akan mengalami regangan searah maupun tegak lurus arah pembebanan benda tersebut. Rasio Poisson (*Poisson's Ratio*) merupakan konstanta yang menyatakan hubungan regangan tegak lurus dengan arah pembebanan (*lateral*) dengan regangan aksial.

$$\nu = - \frac{\text{regangan lateral}}{\text{regangan aksial}} \quad (2.7)$$

dengan :

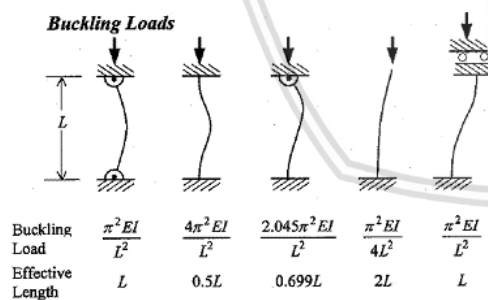
ν = Poisson's Ratio

Sehingga dengan demikian hubungan antara *Modulus Elastisitas*, *Modulus Kekakuan* dan *Poisson's Ratio* dapat diperoleh sebagai berikut :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.8)$$

2.7 Tekuk (*Buckling*)

Buckling atau biasa pula disebut sebagai tekuk adalah merupakan salah satu jenis kegagalan struktur yang pada umumnya terjadi pada struktur kolom atau struktur yang berbentuk tiang. Terjadinya kegagalan ini disebabkan oleh adanya pembebanan secara aksial tekan yang dialami pada ujung struktur tersebut. Jika suatu tiang yang tipis diberikan tekanan sehingga tiang tersebut menjadi bengkok dan terdefleksi secara lateral, maka struktur tersebut dapat dikatakan mengalami *buckling*. Dengan bertambahnya beban aksial pada struktur kolom maka defleksi lateral juga akan bertambah yang pada akhirnya kolom akan benar-benar mengalami deformasi plastis. Silinder atau pun komponen yang berdinding tipis di bawah *compressive stress* rentang terhadap *buckling*. *Buckling* dari *Long Slender Columns Under Compression* (Euler 1707-1783), analisis yang melibatkan penentuan beban aksial kritis bahwa, Jika beban tekan aksial kecil diterapkana pada batang ramping lurus dan sistem ditarik sedikit miring dan dilepaskan maka akan kembali ke posisi lurus. Jika beban tekan aksial besar diterapkan, gerakan *sideways* manapun akan mengakibatkan sistem roboh,. David J.Grieve, 1 maret 2004. Gaya dan *velocity* juga diperlukan untuk sebuah *buckling*. Solusi teoritis Euler akan menimbulkan kekuatan yang tak terbatas pada kolom yang sangat singkat, dan yang jelas akan melebihi materi *stress* utama. Material akan mengalami *buckling* atau pun perubahan bentuk (deformasi) karena ketidakstabilan struktur akibat pembebanan yang diterima. Suatu tumpuan pun juga mempengaruhi suatu proses *Buckling*, sebagaimana diperlihatkan pada gambar 2.15

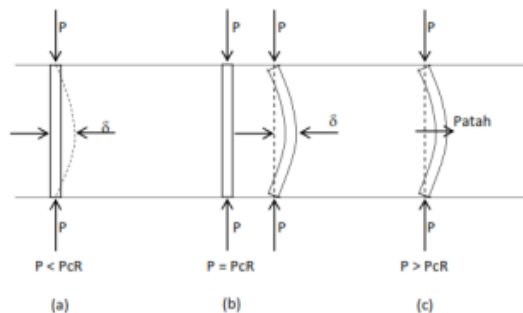


Gambar 2.15 Gambar *Buckling* Karena Pengaruh Tumpuan pada Struktur Kolom
Sumber : Dishong (2003)

2.7.1 Klasifikasi Kestimbangan pada Pembebanan *Buckling*

Suatu bagian dari suatu konstruksi mengalami gaya tekan baik dari beban konstruksi itu sendiri maupun dari beban luar yang bekerja secara aksial yang akan menekuk secara lateral. Suatu kolom yang menerima beban tekan (P), sebelum hancur atau roboh konstruksi tersebut akan menekuk terlebih dahulu. Pada dasarnya pembebanan *buckling* dapat diklasifikasikan berdasarkan kesetimbangannya, yaitu kesetimbangan

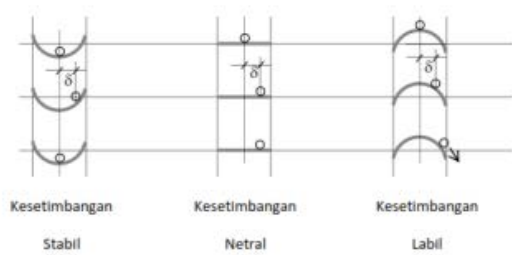
stabil, kesetimbangan netral dan kesetimbangan labil. Pada gambar 2.16 dapat dijelaskan kesetimbangan beban *buckling* sebagai berikut :



Gambar 2.16 Prilaku Struktur Kolom berdasarkan Klasifikasi Kesetimbangan
Sumber : Dasetywan wordpress.com

1. Batang langsing mempunyai perbandingan panjang batang (L) dan diameter batang (D) cukup besar, diberikan beban P lebih kecil dari beban kritis P_{cr} , maka karakteristik batang pada keadaan ini adalah :
 - Batang dalam keadaan stabil.
 - Pada saat P bekerja batang menekuk sebesar δ .
 - Apabila gaya P dihilangkan, batang kembali lurus seperti semula.
2. Batang dibebani gaya tekan P yang sama dengan gaya beban kritis P_{cr} , maka karakteristik batang tersebut adalah ;
 - Batang dalam keadaan kesetimbangan netral.
 - Pada saat P bekerja, batang menekuk sebesar δ .
 - Apabila gaya P dihilangkan, batang tetap pada keadaan yang baru ($\delta = \text{tetap}$).
 - Gaya Kritis $P_{cr} = P_{\text{tekuk}} = P_{\text{maks}} - P$, yang dapat didukung oleh batang.
3. Batang dibebani gaya tekan P yang lebih besar dari gaya kritis P_{cr} , maka karakteristik batang adalah :
 - Batang dalam keadaan kesetimbangan labil.
 - Pada saat gaya P bekerja, batang menekuk sebesar δ .
 - Pada saat gaya P bekerja dengan berat yang konstan, maka batang akan menekuk terus-menerus, sampai akhirnya menjadi patah atau roboh.

Ketiga perilaku struktur kolom tersebut di atas dapat lebih disederhanakan pada gambar 2.17 dengan penjelasannya sebagai berikut :



Gambar 2.17 Perilaku Struktur Kolom Ketika Mengalami Pembebanan Secara Aksial
Sumber : Dasetywan wordpress.com

- Jika $P < P_{cr}$ maka struktur kolom dalam keadaan stabil dan setimbang dengan posisi tegak lurus.
- Jika $P = P_{cr}$, maka struktur kolom berada dalam kondisi netral ekuilibrium baik dalam posisi tegak atau sedikit membengkok.
- Jika $P > P_{cr}$, maka struktur kolom berada dalam kondisi ekuilibrium yang tidak stabil pada keadaan tegak dan oleh karena itu terjadi *buckling*, berlaku rumus pembebanan kritis. Harga pembebanan Kritis P_{cr} , diberikan (persamaan Euler) :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (2.9)$$

dengan :

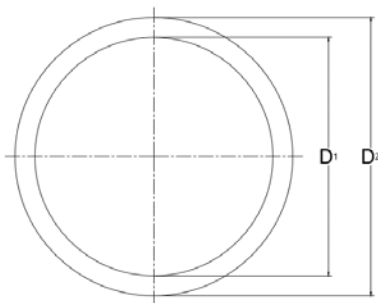
P_{cr} = Beban kritis (N)

E = Modulus elastisitas (Pa)

I = Momen inersia penampang lingkaran (m^4)

L = Panjang kolom (m)

Dimana dalam penelitian ini momen inersia penampang yang digunakan adalah penampang lingkaran yang memiliki ketebalan sebagaimana diilustrasikan dalam gambar 2.18.



Gambar 2.18 Momen Inersia Penampang Lingkaran
Sumber : Achmad, Zainun (1999 : 17)

dimana :

$$I = \frac{\pi}{64} (D_2^4 - D_1^4) \quad (2.10)$$

dengan :

D_1 = Diameter dalam lingkaran (m)

D_2 = Diameter luar lingkaran (m)

I = momen inersia penampang lingkaran (m⁴)

2.7.2 Kategori Kolom

Kegagalan pada suatu elemen struktur tekan yang biasa pula disebut sebagai kolom dapat dibedakan menurut kategorinya sebagai berikut :

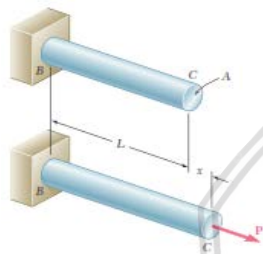
- Kolom panjang, kurus atau biasa pula disebut langsing, yaitu kolom yang kegagalannya ditentukan oleh tekuk. Dimensi arah memanjang jauh lebih besar dibandingkan dengan dimensi arah lateral.
- Kolom pendek biasa pula disebut sebagai kolom gemuk merupakan elemen struktur kolom yang mempunyai nilai perbandingan antara panjang dengan dimensi penampang melintangnya relatif kecil. Apabila beban berlebihan, maka kolom pendek pada umumnya akan gagal karena hancurnya material, (Mayachristin.lecture.ub.ac.id, 2013/05).

2.7.3 Pengaruh *Buckling Euler* Terhadap Pola Deformasi *Crash Box*.

Peran *crash box* sebagai *absorber* dirancang untuk menyerap sebasar mungkin energi kinetik tabrakan melalui pengendalian deformasi. Terkecuali *Buckling Euler*, wujud deformasi berupa *mode concertina*, *diamond* dan *mixed-mode*, merupakan bentuk pola yang diharapkan terjadi untuk memperoleh daya serap energi yang tinggi pada *crash box*. Hal ini disebabkan karena *Buckling Euler* merupakan salah satu fenomena buckling yang menjadi faktor utama menurunnya daya serap energi pada *crash box*, karena terjadi buckling (lendutan) di awal pembebanan sebelum terjadinya deformasi berupa *concertina*, *diamond* atau pun *mix mode*. Tanaskovic, J., Milkovic, D., Lucanin, V., dan Vasic, Franklin (2014), dalam penelitiannya untuk meminimalisir terjadinya *Buckling Euler*, yakni *crash box* dirancang dengan sistem multi segmen. Daya serap energinya meningkat hingga mencapai 60%, disebabkan karena distribusi tegangan terbagi merata dan terjadinya kombinasi penyerapan energi melalui gesekan dan deformasi plastis.

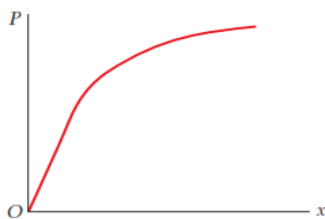
Mode concertina merupakan salah satu pola yang daya serap energinya cenderung lebih tinggi dari mode lainnya. Hal ini diperoleh berdasarkan penelitian oleh Kusyairi, Imam., Choiron, Moch. Agus dan Purnowidodo, Anindito (2015) yang meneliti tentang karakteristik *crash box* pola origami terhadap kemampuannya untuk menyerap energi dan membentuk pola deformasi. Dibuat origami untuk menginisiasi terbentuknya *mode concertina* dan *diamond* guna menghindari terjadinya *Buckling Euler*. Diperoleh penyerapan energi hingga meningkat sampai 92,1 % dan sebanyak 44 % terbentuk *mode concertina*, sementara sisanya 56 % mengalami deformasi membentuk pola *diamond*. *Mode cocertina* mempunyai penyerapan energi tertinggi, yakni 7247,826 J, lebih tinggi 40,27 % dari pola *diamond*.

2.8 Energi Serapan.



Gambar 2.19 Pembebanan Aksial Pada Batang
Sumber : Beer, F.P. et al (2012 : 694)

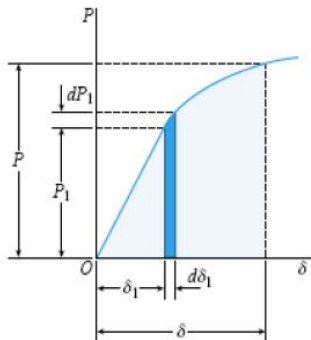
Gambar 2.19 menunjukkan suatu batang BC yang memiliki luas penampang A dengan panjang L dan tumpuan jepit yang diberi pembebanan aksial P. Bilamana pembebanan aksial dilakukan selama waktu tertentu maka hubungan antara beban dan deformasi pada batang dapat digambarkan dalam bentuk grafik hubungan antara beban (*load*) terhadap perpindahan (*displacement*), seperti pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Grafik Hubungan Beban Terhadap Perpindahan
Sumber : Beer, F.P. et al (2012 : 695)

Deformasi plastis yang terjadi sebagai akibat tekanan dari *impactor* kepada *crash box* terjadi karena adanya usaha (*work*) dari *impactor*. Usaha (*work*) ini kemudian diubah menjadi energi regangan dengan mengabaikan perubahan energi ke bentuk lainnya.

Besarnya energi regangan dapat diperoleh berdasarkan luasan yang terdapat di bawah kurva pada grafik hubungan antara beban dan perpindahan, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.21.



Gambar 2.21 Diagram Beban - Perpindahan
Sumber : Gere, James. M (2004 : 116)

Secara geometris, usaha yang dilakukan oleh beban selama dalam nilai P dan δ dianggap sebagai luas daerah di bawah kurva beban-perpindahan, maka usaha total yang dilakukan oleh beban tersebut dapat dituliskan dalam bentuk rumus sebagai berikut :

$$U = W = \int_0^{\delta} P_1 d\delta_1 \quad (2.11)$$

dengan :

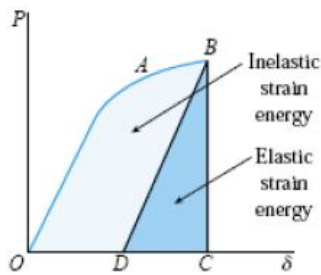
U = Energi regangan (J)

W = Usaha (J)

P = Beban (N)

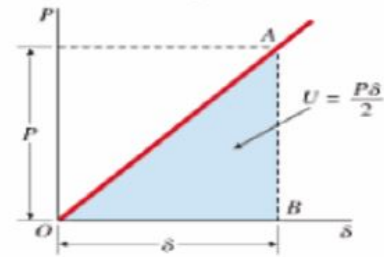
δ = Perpindahan (m)

Energi regangan suatu material yang dibebani terdiri atas energi regangan elastis dan energi regangan inelastis. Di saat pembebanan ditiadakan secara perlahan-lahan material akan kembali pada bentuk semula. Akan tetapi, bilamana batas elastis terlampaui maka material tidak akan kembali kepada bentuknya semula. Hanya sebagian dari energi regangan yang dipulihkan bilamana pembebanan pada material tersebut melewati batas elastis. Gambar 2.22 menunjukkan energi regangan elastis dan plastis pada suatu material.



Gambar 2.22 Energi Regangan Elastis dan Plsatis

Sumber : Gere, James. M (2004 :117)



Gambar 2.23 Diagram Beban-Perpindahan Elastis

Sumber : Gere, James. M (2004 :118)

Pada gambar 2.22 menunjukkan gambaran yang menjelaskan bahwa, selama pembebanan ditiadakan, maka diagram menjadi berubah mengikuti garis BD. Energi regangan inelastis adalah OABDO, hal mana merupakan energi yang hilang dalam proses untuk mengubah bentuk secara permanen.

Pada batas elastis, diagram beban-perpindahan mengikuti garis linear (gambar 2.23). Sehingga besar energi regangan yang tersimpan adalah sebesar luas daerah segitiga yang dibentuk oleh garis linear A dengan sumbu x. Besarnya energi regangan yang tersimpan adalah sama dengan usaha yang dilakukan oleh beban pada material tersebut. Gambar 2.23 menunjukkan diagram beban perpindahan elastis material.

Sehingga rumus energi regangan pada kondisi material elastis adalah :

$$U = W = \frac{P\delta}{2} \quad (2.12)$$

Dimana dapat diperoleh hubungan antara beban dan perpindahan, yaitu:

$$\delta = \frac{PL}{EA} \quad (2.13)$$

Sehingga persamaan energi regangan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$U = \frac{P^2L}{2EA} \quad (2.14)$$

dengan :

P = Beban (N)

L = Panjang material (m)

E = Modulus elastisitas (Pa)

A = Luas penampang (m^2)



Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

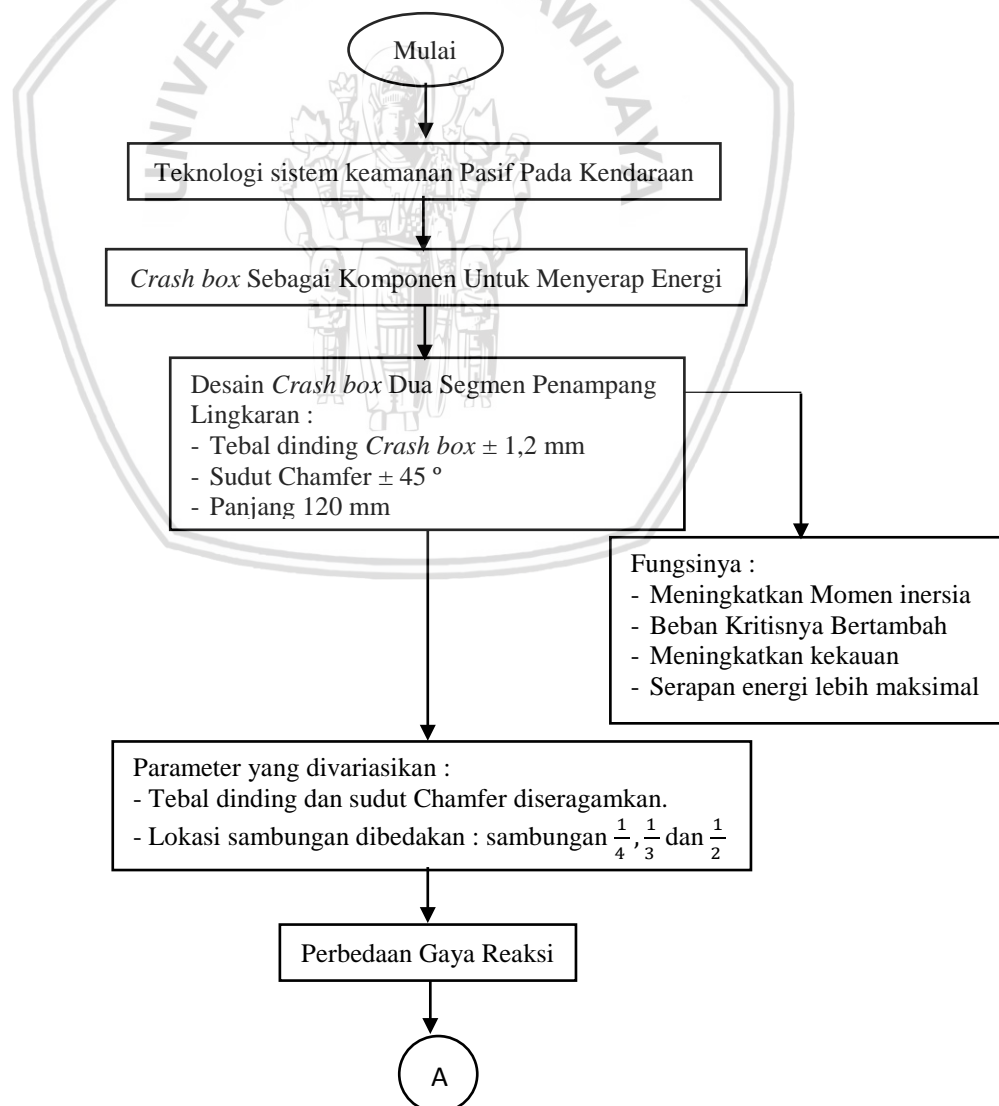
3.1 Kerangka Pemikiran

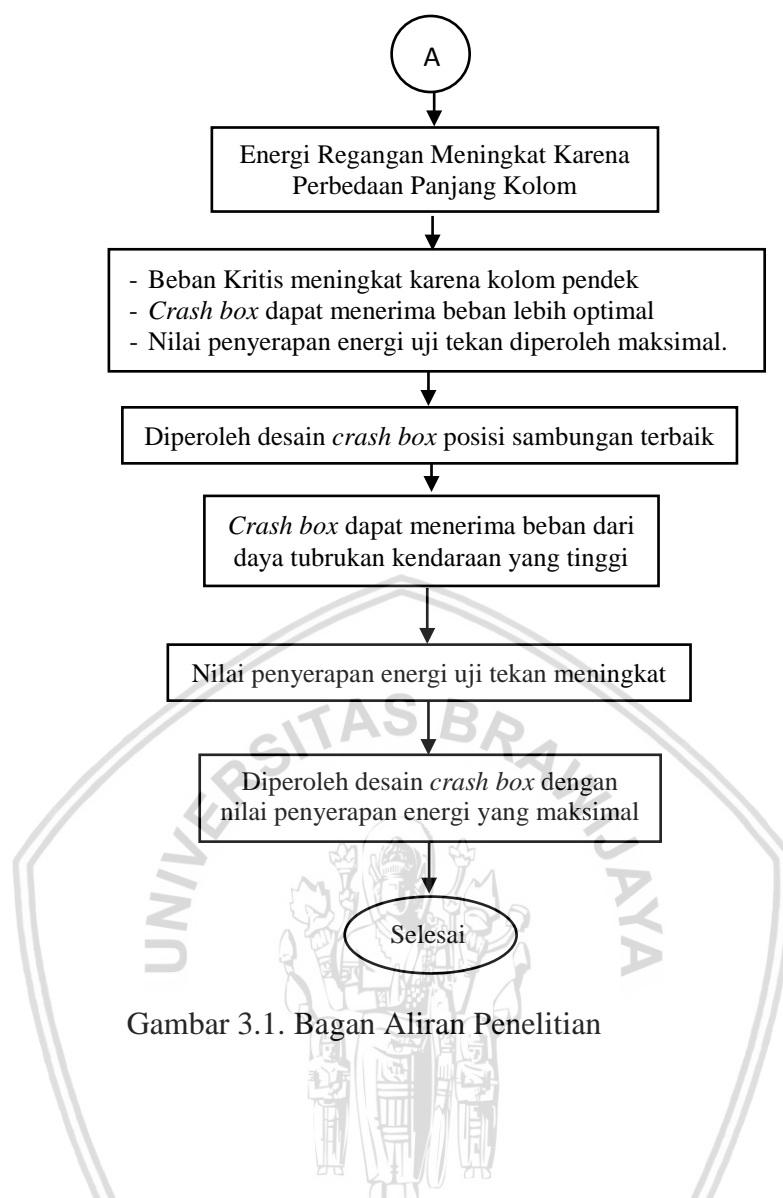
Crash box merupakan komponen salah satu jenis teknologi sistem keselamatan pasif yang terdapat pada suatu kendaraan, dipasang di antara *bumper* dan rangka pada bagian depan dan atau belakang suatu mobil atau kereta. Tujuannya adalah, ketika *bumper* tidak dapat lagi menahan benturan akibat kecelakaan, energi kinetik akibat tabrakan yang diterima oleh mobil atau kereta diminimalisir oleh *crash box* dengan cara menyerap energi tumbukan semaksimal mungkin yang dapat dilihat melalui perilaku deformasi yang terjadi (*concertina mode*, *diamond mode* dan *mixed mode*). Dengan demikian, energi kinetik yang diterima oleh kendaraan tidak langsung tersalurkan ke rangka utama mobil atau kereta sehingga kerusakan parah pada daerah vital mobil dan cedera yang dapat dialami oleh pengemudi maupun penumpang dapat terhindarkan.

Penambahan segmen pada *crash box* merupakan pengembangan dari penelitian bentuk *crash box* sebelumnya. Beda *crash box* satu segmen dengan multi segmen adalah perbandingan panjang kritisnya (L_{cr}). Pada *crash box* satu segmen cenderung mengalami *buckling* karena berstruktur kurus. Suatu struktur bisa dikategorikan kurus apabila memiliki perbandingan panjang kritisnya (L_{cr}) relatif lebih besar daripada diameter kritis (D_{cr}) atau momen Inersia kritisnya (I_{cr}). Oleh karena itu, untuk menghindari terjadinya *buckling* pada saat pembebanan aksial, *crash box* dibuat menjadi struktur kolom yang pendek atau gemuk yaitu dengan cara *crash box* dibuat dalam bentuk multi segmen. Tujuannya adalah agar tegangan dapat terdistribusi secara merata, sehingga dapat diminimalisir terjadinya *buckling*. Dan karena itu, penyerapan energinya akan menjadi maksimal dan meningkat seiring dengan bertambahnya beban kritis (P_{cr}). Sesuai dengan penelitian Asroni dkk (2014) tentang *crash box* 1 segmen dibandingkan dengan *crash box* 2 segmen dan di dukung pula hasil penelitian oleh Choiron, Moch. Agus dkk (2016) dalam penelitiannya tentang *crash box* multi segmen, diperoleh bahwa, ketika beban tekanan telah melewati batas tabung segmen 1, 2 dan tabung segmen 3, energi yang diserap cenderung naik secara signifikan. Hal ini disebabkan tabung pada segmen terakhir (2 atau 3) mengalami perubahan ketebalan. Dimana semakin tebal tabung maka momen inersianya (I_{cr}) pun juga makin besar, sehingga energi yang diserap semakin besar pula. Hal yang membedakan dengan *crash box* 1 segmen, dari awal hingga akhir energi yang diserap kenaikannya relatif konstan, nilainya pun juga lebih rendah dibandingkan dengan *crash box* dengan tabung yang bersegmen lebih banyak (multi segmen).

Penelitian selanjutnya, Velmurugan dan Muralikannan (2009) tentang *crash box* satu segmen berpenampang lingkaran, persegi dan segi enam, yang memiliki keliling, ketebalan dan panjang yang sama, menunjukkan hasil penelitian bahwa, penyerapan energi spesifik justru pada *crash box* jenis lingkaran lebih tinggi dari bentuk jenis yang lainnya. Hal ini memberikan penjelasan bahwa, penggunaan luas permukaan yang sama memberikan nilai momen inersia yang berbeda. Nilai momen inersia inilah yang memiliki peranan penting dalam penyerapan energi, dikarenakan kenaikan mempengaruhi nilai beban kritis pada *crash box*, dan karena semakin meningkatnya beban kritis (P_{cr}) maka besar beban (P) yang diterima juga semakin tinggi sehingga *crash box* akan semakin lebih sulit untuk terdeformasi. Karena itu, *crash box* berpenampang lingkaran (*circle*) dipilih sebagai objek dalam hal penelitian ini, karenan memiliki momen inersia yang lebih tinggi diantara bentuk *crash box* jenis lainnya.

3.2 Bagan Aliran





Gambar 3.1. Bagan Aliran Penelitian

3.3 Hipotesis

Crash box dirancang multi segmen agar panjang kolomnya (L_{cr}) terbagi menjadi kolom-kolom pendek agar tegangan dapat terdistribusi secara merata sehingga tidak mudah menyebabkan terjadinya *buckling*. Kolom yang semakin pendek menyebabkan beban kritis (P_{cr}) semakin meningkat, sehingga penyerapan energinya menjadi maksimal. Karena itu, dapat diduga bahwa, *crash box* pada lokasi jenis sambungan 1/2 akan memiliki kemampuan untuk menyerap energi tertinggi dari model variasi lainnya, sambungan 1/3 dan 1/4.



Halaman ini sengaja di kosongkan

BAB IV

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini digunakan metode eksperimental nyata dan langsung pada objek yang akan diteliti. Metode ini digunakan untuk mengetahui secara langsung nilai energi yang mampu diserap oleh *crash box* berpenampang lingkaran 2 segmen dari material aluminium A6063.

4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini berlangsung di Laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang no 5 Malang. Waktu penelitian pada bulan Mei – Juni 2017.

4.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan tiga variabel diantaranya Variabel bebas, variabel terikat dan variabel kontrol.

4.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang dapat diubah-ubah sehingga dapat mempengaruhi hasilnya. Nilai pada variabel ini ditentukan oleh peneliti agar memperoleh hubungan antara variabel bebas dan variabel terikatnya. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah panjang kolom (L) yang terbagi atas 2 segmen dan divariasikan dalam 3 lokasi posisi letak sambungan, selanjutnya disebut sebagai model sambungan 1/2, sambungan 1/3 dan sambungan 1/4. Gambar dan dimensi spesimen yang di uji dapat dilihat pada gambar 4.2.

4.2.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas dan diperoleh nilainya setelah pelaksanaan pengujian. Dalam penelitian ini yang menjadi variabel terikat adalah penyerapan energi, displacement dan pola deformasi yang terjadi pada *crash box* akibat uji tekan.

4.2.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang besarnya dikendalikan atau dibuat konstan selama penelitian berlangsung. Yang menjadi variabel terkontrol pada penelitian ini adalah:

- Menggunakan *crash box* penampang lingkaran.
- Material *crash box* dari pipa aluminium A6063.
- Kecepatan *impactor* konstan.

4.3. Data Material

Data Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah pipa aluminium A6063 dengan material properties serta material fisik dan mekanik *crash box* A6063 dapat dilihat pada tabel 4.1 dan 4.2 sebagai berikut :

Tabel 4.1. Material Properties *Crash box* A6063

Condition	Proof Stress	Tensile Strenght	Shear Strength	Elongation	Hardness Vickers
6063 – T5 extrude tube	180 Mpa	195 Mpa	150 Mpa	14 %	80 HV

Sumber : ThyssenKrupp Materials (UK) Ltd.

Tabel 4.2. Material Fisik Dan Mekanik *Crash box* A6063

Nama	Ukuran
Densitas	2.69 g/cm ³
Modulus young (E)	68,3 Gpa
Kekuatan Tarik	145-186 Mpa
Elongasi	18 – 33 %
Rasio poisson (v)	0,33
Suhu Leleh	615 ⁰ C
Konduktivitas Thermal	201 -218 W/m *K
Koefisien Ekspansi Thermal linier	2,34*10 ⁻⁵ K ⁻¹
Kapasitas panas	900 J/kg * K
Ketangguhan	29.0 Mpa-m1/2
Machinability	50 %
Modulus Geser	26.0 Mpa
Kekutan Geser	207 Mpa
Modulus Tangen	580 Mpa

Sumber : The Alumunium Assocation

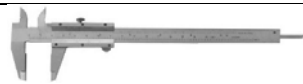
4.4. Spesifikasi Alat Bantu Dan Bahan










Dalam penelitian ini digunakan alat bantu sebagai penunjang untuk berlangsungnya pengujian. Alat bantu tersebut dapat dilihat pada spesifikasi alat bantu berikut.

4.4.1 Spesifikasi Alat Bantu

Berikut merupakan spesifikasi alat bantu yang dilakukan dalam penelitian *Crash box* A6063 dapat dilihat pada tabel 4.3 sebagai berikut :

Tabel 4.3. Spesifikasi Alat Bantu

No	Nama Alat	Fungsi Alat	Gambar Alat
1	Jangka Sorong	Mengukur dimensi <i>Crash box</i> (diameter dalam diameter luar dan Tebal).	

2	Universal Bevel Protactor	Mengukur sudut langsung pada <i>Crash box</i> .	
3	Kamera	mengambil gambar dan video saat penelitian dan pengujian <i>crash box</i> berlangsung.	
4	Tripod	sebagai kaki atau penyangga untuk menaruh kamera biar bisa berdiri sendiri dan tidak goyang, sehingga dapat menjaga kestabilan gambar dan video	
5	Kertas Amplas	mengikis/menghaluskan permukaan <i>Crash box</i> yang telah dibubut untuk mendapatkan ketebalan yang di inginkan dengan cara digosokkan.	
6	Oli	sebagai bahan pelumas agar <i>crash box</i> pada saat di uji berjalan mulus dan bebas dari gangguan untuk menghindari terjadinya Buckling.	
7	Karet Ban	sebagai cincin pada sambungan <i>crash box</i> agar tidak mudah bergeser pada saat pembebanan.	
8	Kuas	Untuk mengoleskan oli pada spesimen <i>Crash box</i> .	
9	Mesin Bubut	membubut pipa sebagai bahan <i>crash box</i> untuk mendapatkan ketebalan yang di inginkan dalam penelitian berlangsung.	
10	Mesin Tekan	Sebagai alat uji Quasi statik untuk mendapatkan besarnya serapan energi yang mampu diserap oleh <i>crash box</i> yang di teliti dalam penelitian ini.	

Berdasarkan tabel 4.3 penjelasan tentang spesifikasi alat bantu dan fungsinya, yang dikhususkan pada poin 10, Berikut merupakan spesifikasi mesin tekan yang digunakan untuk pengambilan data pada saat pengujian sebagaimana diperlihatkan dalam tabel 4.4. sebagai berikut :

Tabel 4.4. Spesifikasi Mesin Kai-Wei

Parameters Model	UTM- 300D	UTM-600D	UTM-1000D
Max. Load	300KN	600KN	1000KN
Accuracy	0.5 class/1 class		
Load Rage	1%-100%FS (no subsection of full travel)		
Measuring range of deformation	1%-100%FS		
Relative error of deformation	1%		
Resolution of deformation	Max.Deformation 1/300000		
Piston stroke (mm)	200 mm		250 mm
Distance between columns	520 mm		565 mm
Max tensile space	650 mm		600 mm
Max. Compression space	550 mm		490 mm
Machine (LxWxH)	840x620x2210	840x620x2210	1100x900x2510
Weight	About 1500 Kg	About 2000 Kg	About 3500 Kg

4.4.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah pipa aluminium A6063 dapat dilihat pada gambar 4.1 sebagai berikut :



Gambar 4.1. Aluminium A6063

Berdasarkan gambar 4.1. Aluminium A6063 memiliki diameter luar rata-rata 76,1625 mm dan diameter dalam rata-rata 70,575 mm. Adapun komposisi Bahan aluminium A6063 dapat dilihat pada tabel 4.5. sebagai berikut :

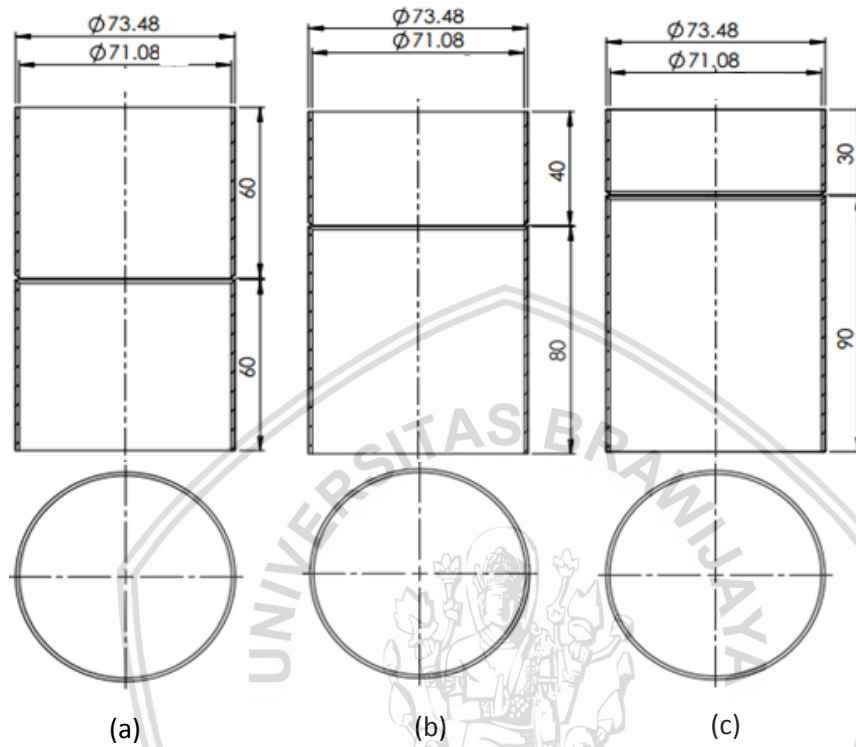
Tabel 4.5. Komposisi Bahan Aluminium A6063

Element % Present	Element % Present
Manganese (Mn)	0.0 - 0.10
Iron (Fe)	0.0 - 0.35
Magnesium (Mg)	0.45 - 0.90
Silicon (Si)	0.20 - 0.60
Zinc (Zn)	0.0 - 0.10
Titanium (Ti)	0.0 - 0.10
Chromium (Cr)	0.0 - 0.10
Copper (Cu)	0.0 - 0.10
Aluminium (Al)	Balance

Sumber : ThyssenKrupp Materials (UK) Ltd.

4.4.3. Dimensi Spesimen

Berikut merupakan gambar dimensi spesimen yang digunakan dalam penelitian *crash box* A6063 dapat dilihat pada gambar 4.2 sebagai berikut :



Gambar 4.2. Dimensi Spesimen *Crash box* (a) sambungan $\frac{1}{2}$, (b) sambungan $\frac{1}{3}$, (c) sambungan $\frac{1}{4}$

Adapun rincian dimensi hasil bubutan spesimen untuk tebal dan sudut chamfer pada *crash box* 2 segmen untuk setiap jenis sambungan pada masing – masing segmen dapat dilihat pada tabel 4.6. sebagai berikut :

Tabel 4.6 Hasil Bubutan Spesimen *Crash box* Untuk 2 Segmen

No	Jenis Sambungan	Tebal (mm)	Sudut (°)
1	Sambungan $\frac{1}{2}$	$t_1=1,1625$	45,3700
		$t_2=1,4250$	46,6875
2	Sambungan $\frac{1}{3}$	$t_1=1,2250$	44,940
		$t_2=1,2375$	55,000
3	Sambungan $\frac{1}{4}$	$t_1=1,2000$	53,000
		$t_2=1,2375$	55,310

4.5. Prosedur Penelitian

Proses pengujian penyerapan energi terhadap *crash box* melalui mesin uji tekan, dilakukan dengan langkah–langkah sebagai berikut :

1. Menyediakan pipa alumunium A6063 sebagai bahan untuk spesimen pengujian *crash box*.
2. Pipa dibubut untuk mendapatkan dimensi sesuai dengan ketebalan pipa, sudut chamfer, dan panjang masing-masing segmen pada setiap variasi model sambungan yang akan diteliti.
3. Menghaluskan pipa hasil bubutan dengan menggunakan amplas 1000, sekaligus bertujuan untuk menghilangkan geram - geram bekas bubutan sehingga pada saat pengukuran dimensi, kesalahan akibat lapisan geram – geram dapat dihindari.
4. Mengukur dimensi riil hasil bubutan pipa dengan menggunakan jangka sorong untuk mengetahui panjang dan tebal rata – rata pipa dan menggunakan Universal bevel protector untuk mengetahui sudut *chamfer* pipa.
5. Spesimen di ikat dengan menggunakan cincin karet agar sambungan pada pipa tidak mudah bergeser pada saat dilakukan proses pengujian sehingga dapat meminimalisir terjadinya *buckling*.
6. Melumasi spesimen dengan menggunakan kuas agar merata dan oli digunakan sebagai pelumas agar menjadi licin, mulus dan tidak kaku menusuk masuk pada saat proses penekanan.
7. Meletakan spesimen pada titik pusat mesin pada bagian *fixed* yang berfungsi sebagai tumpuan dan meletakan *impactor* pada posisi di atas *crash box* (segmen1).
8. Kamera di siapkan dan agar tidak goyang pada saat pengambilan video digunakan tripod dan selanjutnya diletakan di depan spesimen yang akan diuji.
9. Pengujian dilakukan ditandai dengan turunnya *impactor* secara perlahan – lahan sekaligus menunjukkan bahwa, pembebanan dan penyerapan energi sedang berlangsung dan digambarkan dalam bentuk grafik di layar monitor.

4.6. Analisa FEM (Finite Element Method)

Metode elemen hingga merupakan salah satu prosedur numerik dengan konsep dasarnya adalah pembagian (*diskritisasi*), yaitu memecah domain atau daerah perhitungan menjadi beberapa daerah-daerah kecil yang berhingga dan memiliki bentuk geometri yang

lebih sederhana dari kontinumnya yang disebut elemen hingga. Analisa metode elemen hingga digunakan untuk mendapatkan suatu nilai pendekatan (bukan eksak) berdasarkan asumsi perpindahan atau tegangan atau dapat juga berdasarkan gabungan dari asumsi keduanya.

Analisa dengan menggunakan *software* berbasis *finite element method (FEM)* pada penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan dua hasil output data dari hasil pengujian aktual yang dilakukan di laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil Universitas Negeri Malang, melalui pengujian dengan menggunakan mesin uji tekan *quasi static*. Sementara pengujian simulasi komputer dilakukan di Laboratorium Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem (SPRS) Fakultas Teknik Jurusan Mesin Universitas Brawijaya Malang.

Adapun model uji serta asumsi-asumsi yang digunakan pada simulasi dengan menggunakan *software* berbasis *Finite Element Methode (FEM)* adalah sebagai berikut :

- Variabel bebas

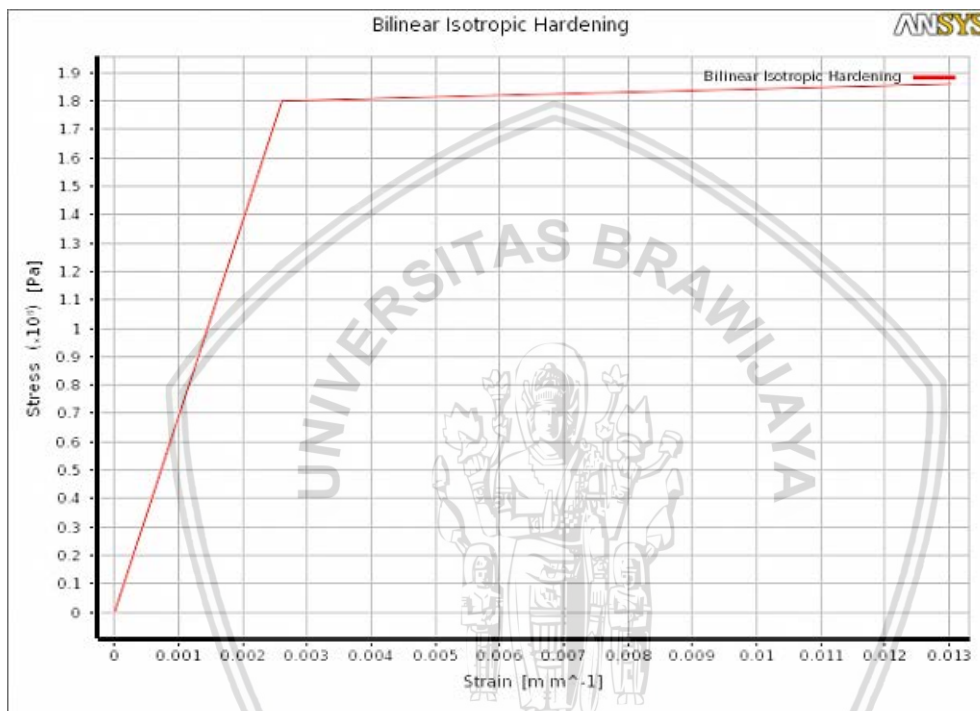
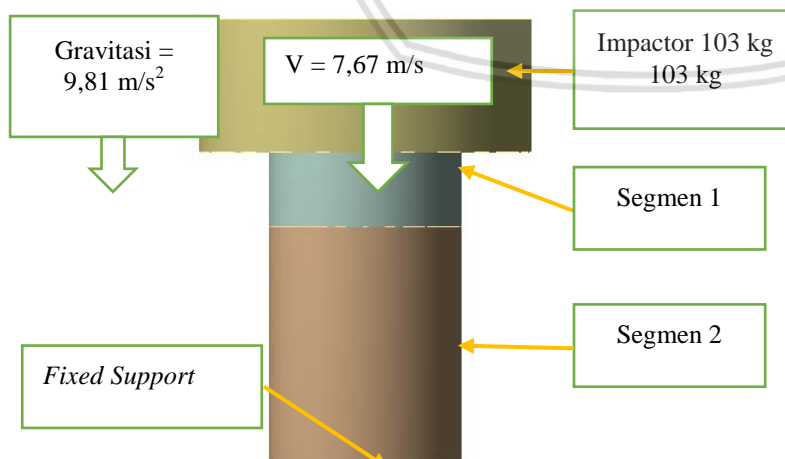
Menggunakan variabel bebas yang sama pada eksperimen nyata, yaitu letak posisi sambungan yang divariasikan dalam 3 model sambungan 1/2, 1/3 dan 1/4 dari total panjang *crash box* 120 mm (lihat gambar 4.2).

- Variabel terikat : penyerapan energi, *force reaction*, pola deformasi
- Variabel terkontrol :
 - a. Pemodelan material menggunakan *Bilinear Isentropic Hardening*
 - b. Kecepatan *Impactor* sebesar 7,67 m/s (berdasarkan penelitian Velmurugan, 2009)
 - c. Panjang *crash box* sebesar 120 mm.

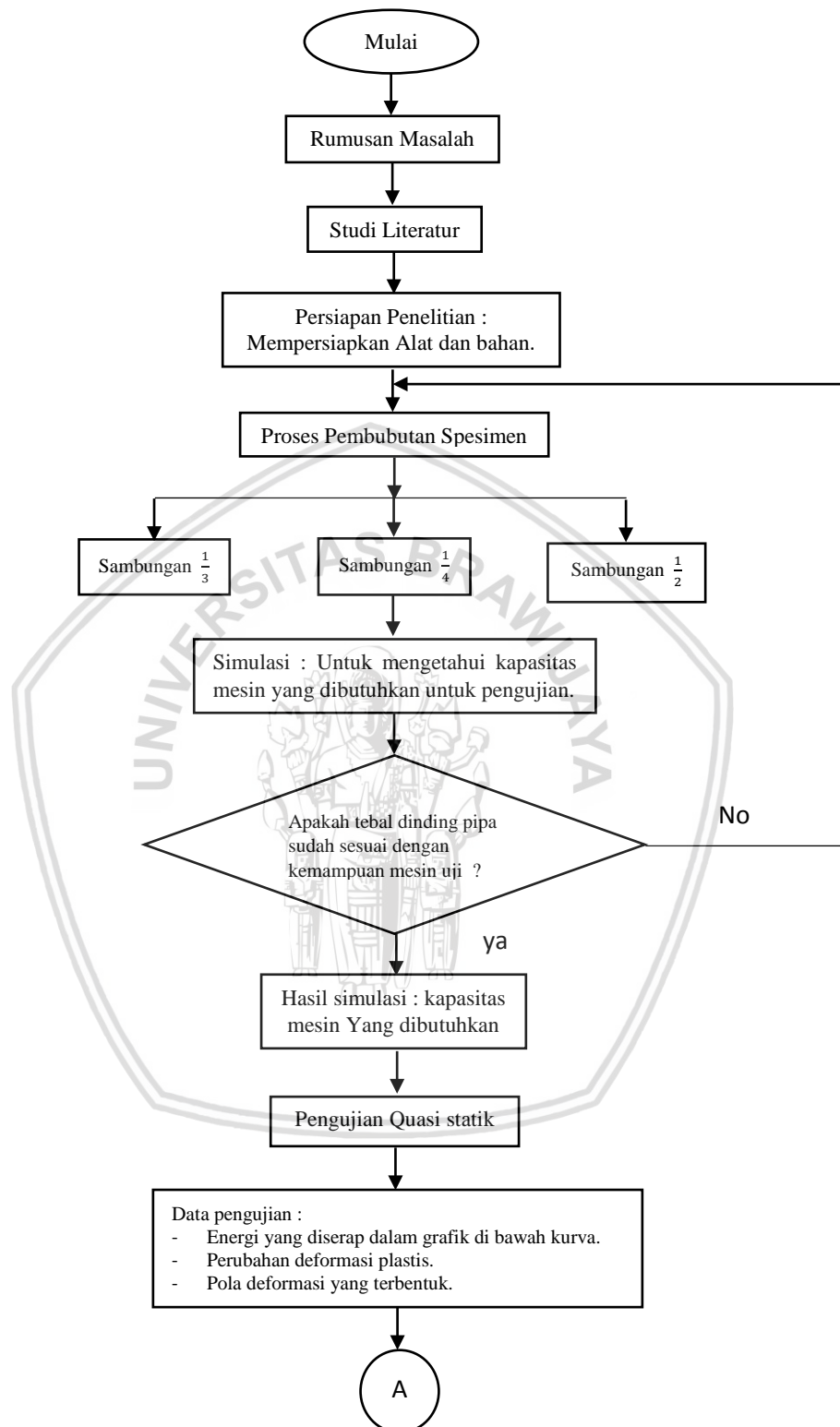
Material *crash box* menggunakan Al 6063-T5 dengan pemodelan *Bilinear Isentropic Hardening*. *Impactor* diasumsikan sebagai *rigid body* yang menumbuk *crash box* dengan kecepatan 7,67 m/s selama 0,013 detik. Percepatan gravitasi diatur sebesar 9,81 m/s² searah dengan arah kecepatan *impactor*. Pada bagian bawah *crash box* diatur sebagai *fixed support*.

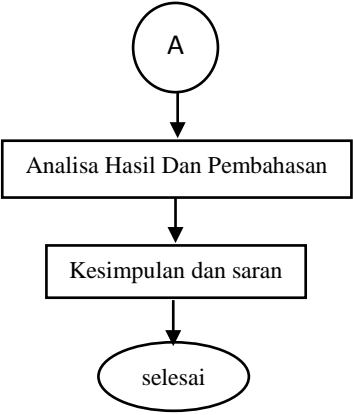
Tabel 4.7. Material Properties dari Al 6063-T5

<i>Nama</i>	<i>Nilai</i>
<i>Density</i> (kg/m ³)	2700
<i>Young's Modulus</i> (MPa)	69000
<i>Poisson Ratio</i>	0,33
<i>Yield Strength</i> (MPa)	180
<i>Tangent Modulus</i> (MPa)	580

Gambar 4.3. Pemodelan Material *Bilinear Isotropic Hardening* Al 6063-T5Gambar 4.4. *Boundary Condion* dari *Crash box*

4.7. Diagram Alir Penelitian





Gambar 4.5. Diagram Alir Penelitian

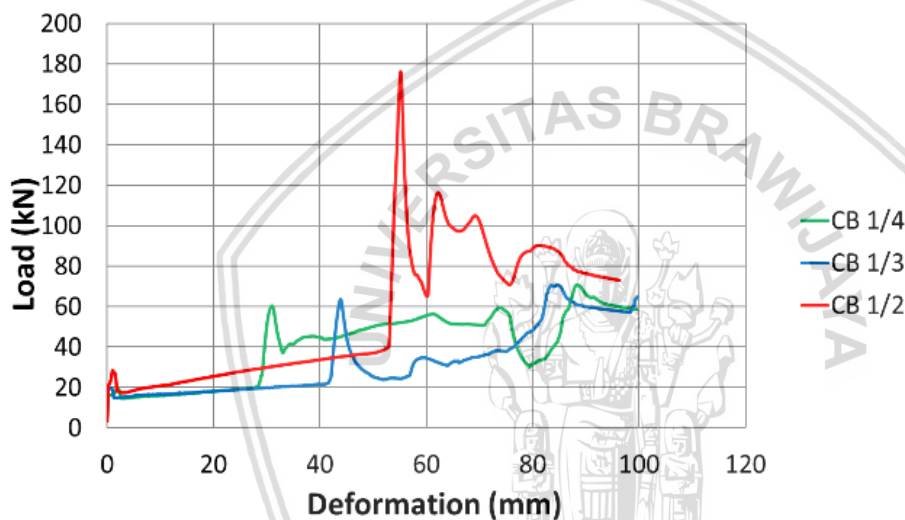


BAB V

ANALISA DAN PEMBAHASAN

5.1 Force reaction Hasil Eksperimen Nyata

Force reaction adalah gaya yang diberikan oleh *crash box* sebagai reaksi untuk menahan tekanan dari *impactor*. Pada saat *impactor* dikenai beban untuk menekan *crash box*, terjadi gaya aksi yang dilakukan oleh *impactor* ke *crash box* dan akan menimbulkan gaya reaksi pada tumpuan (*support*) *crash box*. Akibat gaya aksi dari *impactor* menyebabkan *crash box* mengalami deformasi. Jumlah gaya yang diberikan oleh *impactor* selama berlangsungnya deformasi akan menghasilkan energi regangan pada *crash box*. *Force reaction (load)* pada *crash box* setelah dilakukan uji *quasi static* dapat dilihat pada gambar 5.1.



Gambar 5.1 Grafik Hubungan Gaya (*load*) dan *Deformation* pada Setiap Model Sambungan *Crash box*.

Pada gambar 5.1 menunjukkan grafik hubungan antara beban (*load*) terhadap *deformation*. Grafik tersebut diperoleh dengan menggabungkan grafik hubungan beban (*load*) terhadap waktu yang diperoleh dari hasil pengujian eksperimental nyata pada masing-masing sambungan *crash box*. Dari grafik gambar 5.1 secara umum dapat dilihat bahwa, di awal pembebanan dibutuhkan gaya sebesar 25-30 kN untuk mendorong tabung segmen satu memasuki area tabung segmen dua. Dorongan oleh tekanan dari *impactor* merupakan fase pertama dimana proses penyerapan energi terjadi dengan cara melalui gesekan antara tabung segmen satu dan tabung segmen dua. Penyerapan energi pada fase pertama berlangsung hingga batas akhir segmen satu memasuki segmen dua. Memasuki fase kedua yakni, terjadinya *folding* pertama yang ditandai dengan meningkatnya gaya reaksi (*load*) pada masing-masing model *crash box*. *Folding* pertama dialami terlebih dahulu oleh *crash box*

yang salah satu segmennya memiliki kolom lebih panjang dari *crash box* lainnya. Pada gambar 5.1 terlihat bahwa, untuk pertama kalinya mengalami *folding* secara berturut-turut dialami oleh *crash box* model sambungan 1/4 disusul kemudian sambungan 1/3 dan terakhir adalah *crash box* sambungan 1/2. Merupakan hasil yang memenuhi ketentuan menurut teori persamaan (2-9) dari Euler.

Pada model *crash box* sambungan 1/2 mempunyai nilai *force reaction* maksimum tertinggi sebesar 176,166 kN. *Displacement* pada *crash box* diawali dengan adanya gesekan kemudian terjadi beban kejut akibat adanya gabungan gaya dari segmen satu terhadap segmen dua. Selanjutnya *crash box* mengalami tiga kali *folding*. *Folding* pertama dialami terjadi pada 54,89 mm, *folding* kedua dialami terjadi pada 61,33 mm dan *folding* terakhir dialami terjadi pada 67,48 mm.

Crash box model sambungan 1/3 mempunyai nilai *force reaction* terendah yaitu, sebesar 70,948 kN. *Displacement* pada *crash box* dimulai dengan adanya gabungan gaya dari segmen satu terhadap segmen dua. Selanjutnya membentuk *folding* pada 43,65 mm. *folding* kedua terjadi pada 83,06 mm disertai dengan robeknya dinding tabung segmen dua menyebabkan menurunnya *force reaction* sampai pada akhirnya pembebanan berhenti.

Pada *crash box* model sambungan 1/4 mempunyai nilai *force reaction* maksimum sebesar 70,946 kN. *Crash box* mengalami tiga kali *folding*. *Folding* pertama terjadi pada 30,61 mm. *Folding* kedua terjadi pada 72,72 mm dan terakhir terjadi *folding* ketiga pada 87,77 mm.

Pada *Crash box* sambungan 1/2 panjang segmen 1 dan segmen 2 adalah sama, sehingga tidak terdapat kolom panjang, menyebabkan beban kritisnya (P_{cr}) lebih besar. Sedangkan pada *crash box* sambungan 1/3 dan sambungan 1/4 mempunyai panjang segmen yang berbeda, sehingga salah satu segmen menjadi kolom panjang yang menyebabkan beban kritisnya (P_{cr}) lebih kecil. Akan tetapi, dari hasil eksperimen berdasarkan grafik pada gambar 5.1, diketahui bahwa, pada *crash box* sambungan 1/4 mempunyai nilai *force reaction* rata-rata lebih besar jika dibandingkan dengan *crash box* pada sambungan 1/3. Hal ini disebabkan karena, pada *crash box* sambungan 1/4 terjadi *buckling* saat batas akhir segmen 1 memasuki segmen 2. *Buckling* tersebut disertai dengan robeknya dinding tabung selanjutnya terlipat memanjang mengikuti alur ke bawah sepanjang dinding, sehingga membentuk lapisan tambahan yang berdampak secara langsung terhadap meningkatnya momen inersia (I) menyebabkan *force reaction* (beban kritis) menjadi besar. Hal ini sesuai dengan kaidah berdasarkan pada persamaan (2-9) dari Euler :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$$

dengan :

P_{cr} = Beban Kritis (N)

E = Modulus Elastisitas (MPa)

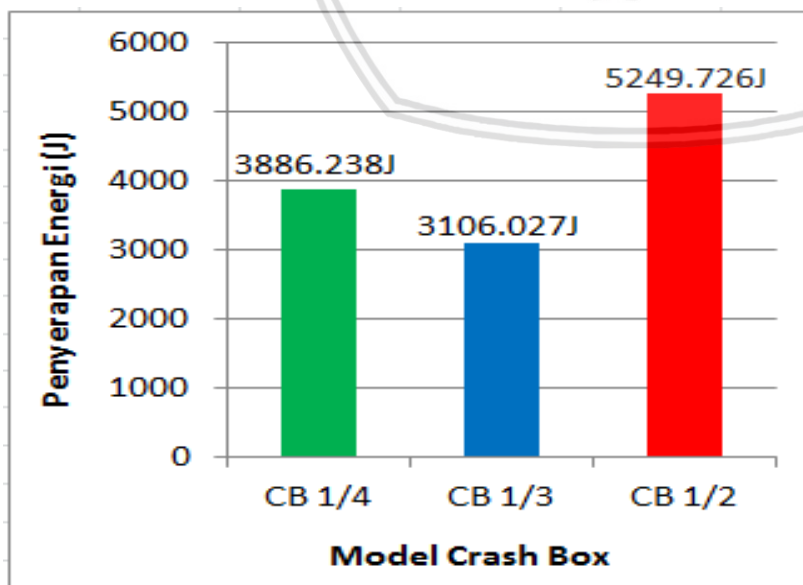
I = Momen Inersia Penampang (m⁴)

L = Panjang kolom (m)

Dimana persamaan tersebut merupakan persamaan untuk mencari beban kritis (P_{cr}) dari suatu struktur kolom. Beban kritis adalah beban minimal yang dibutuhkan untuk suatu struktur kolom yang mengalami deformasi. Dari persamaan tersebut panjang kolom (L) berbanding terbalik dengan beban kritis. Tetapi berbanding lurus dengan momen inersia (I). Semakin panjang suatu struktur kolom maka beban kritisnya semakin kecil. Dan sebaliknya, semakin besar momen inersianya akan semakin besar pula beban kritisnya (P_{cr}).

5.2 Penyerapan Energi Hasil Eksperimen Nyata

Kemampuan *crash box* untuk meyerap energi didefinisikan sebagai besarnya usaha (*work*) yang dibutuhkan untuk menghasilkan deformasi pada *crash box* atau biasa pula disebut energi regangan (*strain energy*). Pada saat *impactor* menekan *crash box*, energi tekanan dari *impactor* akan dikonversikan menjadi energi regangan yang mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk pada *crash box*. Energi regangan didapatkan melalui luas daerah di bawah kurva (lihat gambar 5.1) sebagai usaha yang dilakukan oleh *impactor* sehingga energi regangan diasumsikan sebagai hasil konversi energi kinetik dari *impactor*.



Gambar 5.2 Penyerapan Energi pada masing-masing Sambungan *Crash box*

Dari gambar 5.2 menunjukkan bahwa, penyerapan energi terbesar terjadi pada *crash box* sambungan 1/2 yaitu sebesar 5249,726 J. Selanjutnya, pada *crash box* sambungan 1/4 diperoleh nilai sebesar 3886,238 J. Dan *crash box* terendah terjadi pada *crash box* sambungan 1/3 dengan nilai penyerapan energi sebesar 3106,027 J. Pada *crash box* sambungan 1/2 mempunyai nilai penyerapan energi terbesar di antara model sambungan lainnya. Hal ini disebabkan karena *crash box* pada model sambungan 1/2 mempunyai nilai *force reaction* (*load*/beban) tertinggi di antara model lainnya sesuai dengan persamaan (2-11)

$$U = W = \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta$$

dengan :

U = Energi regangan (J)

W = Usaha (J)

P = Beban (N)

δ = Perpindahan (m)

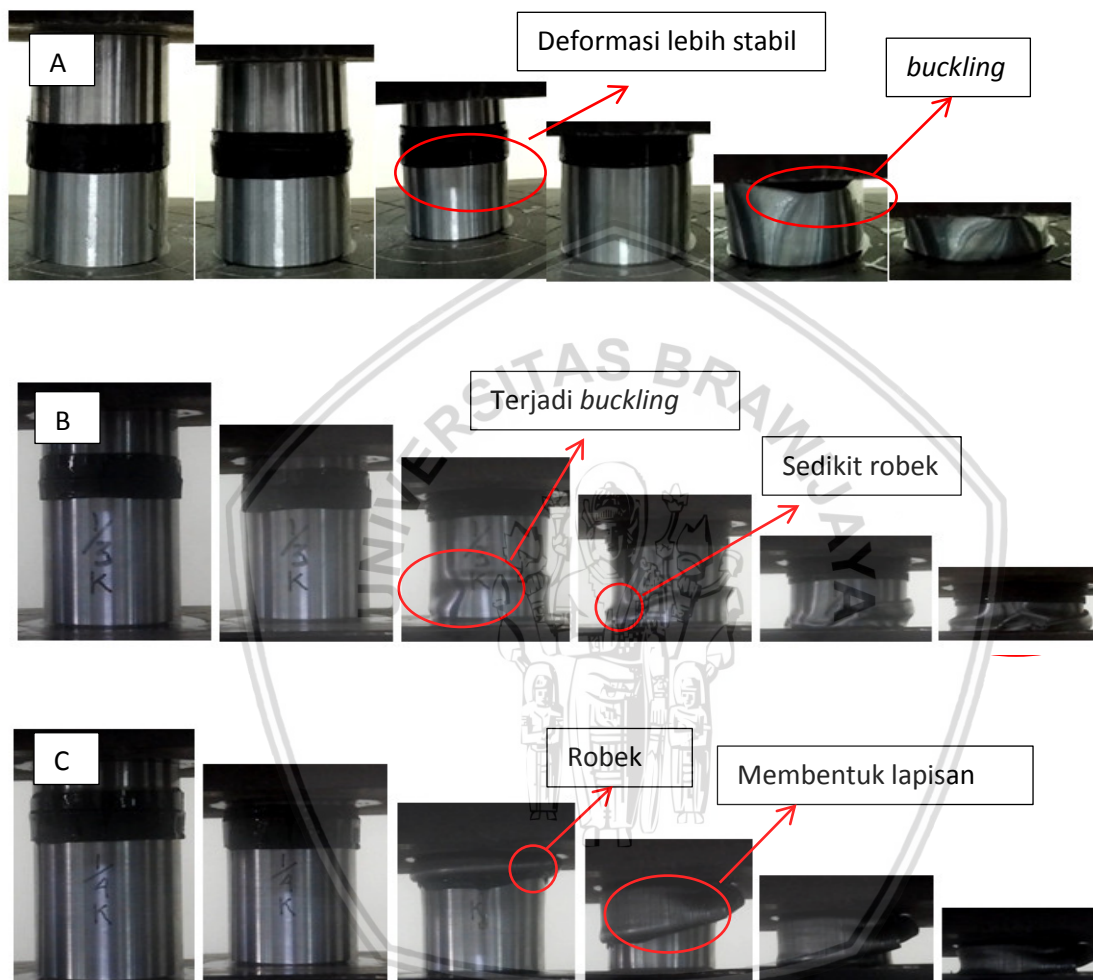
Pada persamaan tersebut di atas merupakan persamaan yang digunakan untuk mencari besarnya energi regangan atau usaha. Dari persamaan tersebut diketahui bahwa, nilai energi berbanding lurus dengan nilai beban sehingga semakin besar nilai beban, maka nilai energinya semakin besar pula.

Namun, pada *crash box* sambungan 1/4 mempunyai nilai penyerapan energi yang lebih tinggi sebesar 3886,238 J jika dibandingkan dengan nilai penyerapan energi yang dihasilkan oleh *crash box* pada model sambungan 1/3, yakni sebesar 3106,027 J. Hal ini terjadi disebabkan karena nilai penyerapan energi pada *crash box* dipengaruhi oleh *force reaction* dari gaya yang diberikan oleh *crash box* sebagai reaksi untuk menahan beban. Meningkatnya *force reaction* pada *crash box* model sambungan 1/4 disebabkan terjadinya lapisan tambahan akibat *buckling* yang disertai dengan robeknya dinding tabung segmen 2 (lihat gambar 5.3.c). Hal ini mempengaruhi ketebalan pada dinding *crash box* yang terdeformasi, sehingga memberikan dampak bertambahnya momen inersia pada *crash box*. Sesuai dengan persamaan (2-9) dari *Euler*, dimana momen inersia berbanding lurus dengan beban kritisnya sehingga makin besar beban kritisnya maka semakin besar pula penyerapan energi yang terjadi.

5.3. Pola Deformasi *Crash box* Hasil Eksperimen Nyata

Crash box atau tabung yang berdinding tipis mempunyai kemungkinan tiga pola deformasi yang dapat dialami apabila dikenai pembebanan *quasi static*, yaitu *concertina*

(*axisymmetric*), *diamond* (*non-axisymmetric*) dan *mixed mode*, yaitu kombinasi pola yang terbentuk antara *concertina* dan *diamond*. Pola deformasi dari masing-masing model *crash box* yang diperoleh dari hasil eksperimental nyata dapat dilihat pada gambar 5.3, 5.4 dan 5.5 sebagai berikut:



Gambar 5.3 Pola Perubahan Deformasi *Crash box* (a) Sambungan 1/2 (b) Sambungan 1/3 (c) sambungan 1/4



Gambar 5.4 Pola Deformasi *Crash box* Pandangan Atas (a) Sambungan 1/2 (b) Sambungan 1/3 (c) sambungan 1/4



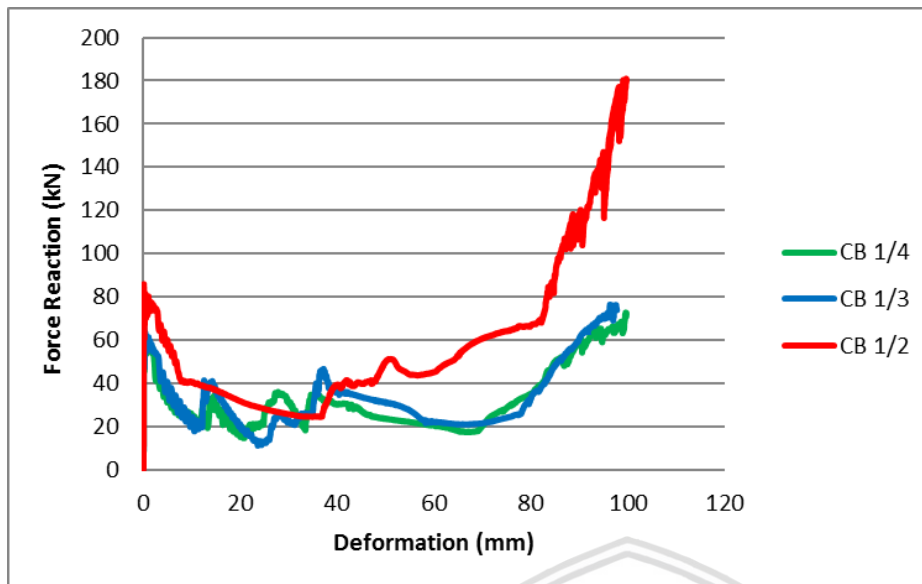
Gambar 5.5 Pola Deformasi *Crash box* Pandangan Samping (a) Sambungan 1/2 (b) Sambungan 1/3 (c) sambungan 1/4

Dari hasil pengujian dihasilkan bahwa, pada *crash box* model sambungan 1/4 dan 1/3 terjadi *buckling*, hal ini terjadi karena pada kedua dari model sambungan tersebut salah satu segmennya mempunyai kolom panjang, sehingga menyebabkan beban kritisnya menjadi kecil karena itu penyerapan energinya tidak dapat bekerja secara maksimal. Pada *crash box* model sambungan 1/4 dan 1/3 cenderung membentuk model *mixed-mode (axisymmetric-diamond)*. Deformasi pada *crash box* model sambungan 1/4 diawali dengan adanya *buckling* yang menyebabkan dinding *crash box* robek memanjang dan terjadi lapisan memasuki segmen dua sehingga ketebalan dinding *crash box* menjadi bertambah. Pada *crash box* sambungan 1/3 pola deformasi hampir sama dengan pola deformasi pada model sambungan *crash box* 1/4, akan tetapi pada *crash box* sambungan 1/3 terjadi robek yang tidak terlalu panjang dan hampir membentuk pola *Concertina (axisymmetric)*. Dibandingkan dengan *crash box* model sambungan 1/2 panjang segmen satu dan segmen dua adalah sama, sehingga tidak ada kolom panjang, karena itu deformasi terjadi cenderung stabil dan menghasilkan pola deformasi dengan bentuk pola *mixed mode (axisymmetric-diamond)*, menyebabkan penyerapan energinya lebih optimal daripada model sambungan lainnya.

5.4 Force reaction Hasil Simulasi Komputer

Force reaction yang merupakan gaya yang diberikan oleh *crash box* sebagai reaksi untuk menahan tekanan yang berasal dari *impactor* berdasarkan hasil simulasi dari komputer ditunjukkan pada gambar 5.6, hubungan gaya dan *deformation* pada setiap model sambungan *crash box*.

Pada gambar 5.6 dari ketiga jenis sambungan *crash box* digambarkan bahwa, di awal grafik dari *deformation* 0 mm - 0,2 mm, *force reaction* mengalami kenaikan cukup signifikan yakni 65 – 85 kN. Hal ini menunjukkan bahwa, untuk mendorong segmen 1 memasuki segmen 2 dibutuhkan energi cukup besar. Gesekan terjadi sepanjang batas akhir segmen 1 memasuki segmen 2 ditandai dengan turunnya garis grafik, kemudian secara perlahan-lahan naik hingga terjadinya *folding*.



Gambar 5.6 Grafik Hubungan *Force reaction* dan *deformation* Hasil Simulasi

Folding pertama dialami oleh *crash box* jenis sambungan 1/4 disusul kemudian sambungan 1/3 dan terakhir terjadi pada *crash box* sambungan 1/2. Hal yang sama sebagaimana pula yang dihasilkan pada hasil eksperimental nyata.

Pada *crash box* sambungan 1/2, *folding* pertama terjadi dengan nilai *force reaction* 39,356 kN pada *deformation* 0,2041 mm. Dilanjutkan kemudian *folding* kedua pada *deformation* 51,508 m dengan nilai *force reaction* sebesar 51,051 kN. Dan terakhir terjadi *folding* ketiga dengan nilai *force reaction* tertinggi dihasilkan 180,18 kN pada *deformation* 99,693 mm. *Force reaction* rata-rata dihasilkan oleh *crash box* dari *deformation* 0 mm hingga 99,693 mm diperoleh nilai sebesar 58,643 kN.

Selanjutnya, *crash box* sambungan 1/3 diperoleh *force reaction* pada *folding* pertama 40,436 kN pada *deformation* 14,130 mm. *Folding* kedua terjadi dengan nilai *force reaction* sebesar 42,285 kN pada *deformation* sebesar 37,521 mm. Dan pada *folding* terakhir terjadi dengan nilai *force reaction* sebesar 75,503 kN pada *deformation* 97,424 mm. *Force reaction* rata-rata dari *deformation* 0 mm hingga 97,424 mm adalah sebesar 33,280 kN.

Terakhir, pada *crash box* 1/4, *folding* pertama terjadi dengan nilai *force reaction* sebesar 33,528 kN pada *deformation* 14,567 mm. Dan *folding* kedua terjadi dengan nilai *force reaction* sebesar 35,495 kN pada *deformation* 27,970 mm. Terakhir, *folding* ketiga terjadi dengan *force reaction* sebesar 72,103 kN pada *deformation* 99,481 mm. *Force reaction* rata-rata dihasilkan dari *deformation* 0 mm hingga pada 99,481 mm adalah sebesar 32,262 kN.

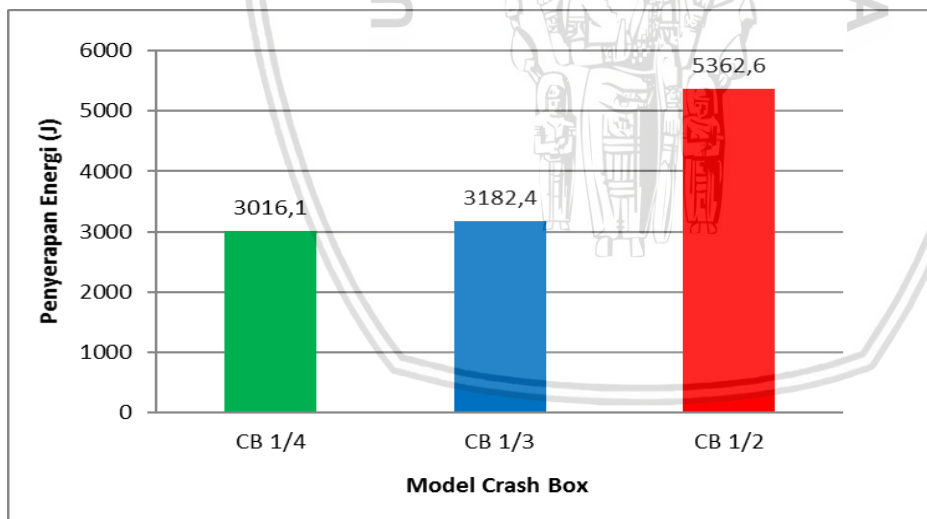
Secara umum berdasarkan hasil dari *force reaction* rata-rata yang dihasilkan melalui simulasi komputer dapat disampaikan bahwa, panjang kolom pada suatu struktur cukup signifikan mempengaruhi *force reaction* pada *crash box*, sesuai dengan persamaan (2-9) dari Euler dengan rumus :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$$

Dimana panjang kolom (L) berbanding terbalik dengan beban kritisnya (P_{cr}). Sama seperti halnya pada eksperimental nyata, diperoleh trend yang sama terjadi pula pada simulasi komputer pada masing-masing jenis sambungan. Dimana kolom yang semakin pendek menyebabkan beban kritisnya semakin tinggi demikian pula sebaliknya, kolom yang semakin panjang menyebabkan beban kritisnya semakin rendah.

5.5 Kemampuan Penyerapan Energi *Crash box* Hasil Simulasi

Besarnya penyerapan energi sebagai usaha yang dilakukan oleh *crash box* untuk menghasilkan *deformation* berdasarkan simulasi komputer ditunjukkan pada gambar 5.7 sebagai berikut :



Gambar 5.7 Penyerapan Energi pada *Crash box* Hasil Simulasi Komputer

Sebagaimana pula halnya penyerapan energi yang di hasilkan dari eksperimental nyata bahwa, penyerapan energi pada *crash box* dipengaruhi oleh *force reaction* dari gaya yang diberikan oleh *crash box* sebagai reaksi untuk menahan beban. *Force reaction* yang lebih besar akan menghasilkan pula penyerapan energi yang lebih tinggi. Demikian pula sebaliknya, *force reaction* yang nilainya lebih kecil akan menghasilkan penyerapan energi yang lebih rendah. Sesuai dengan *force reaction* yang telah dihasilkan sebelumnya, maka

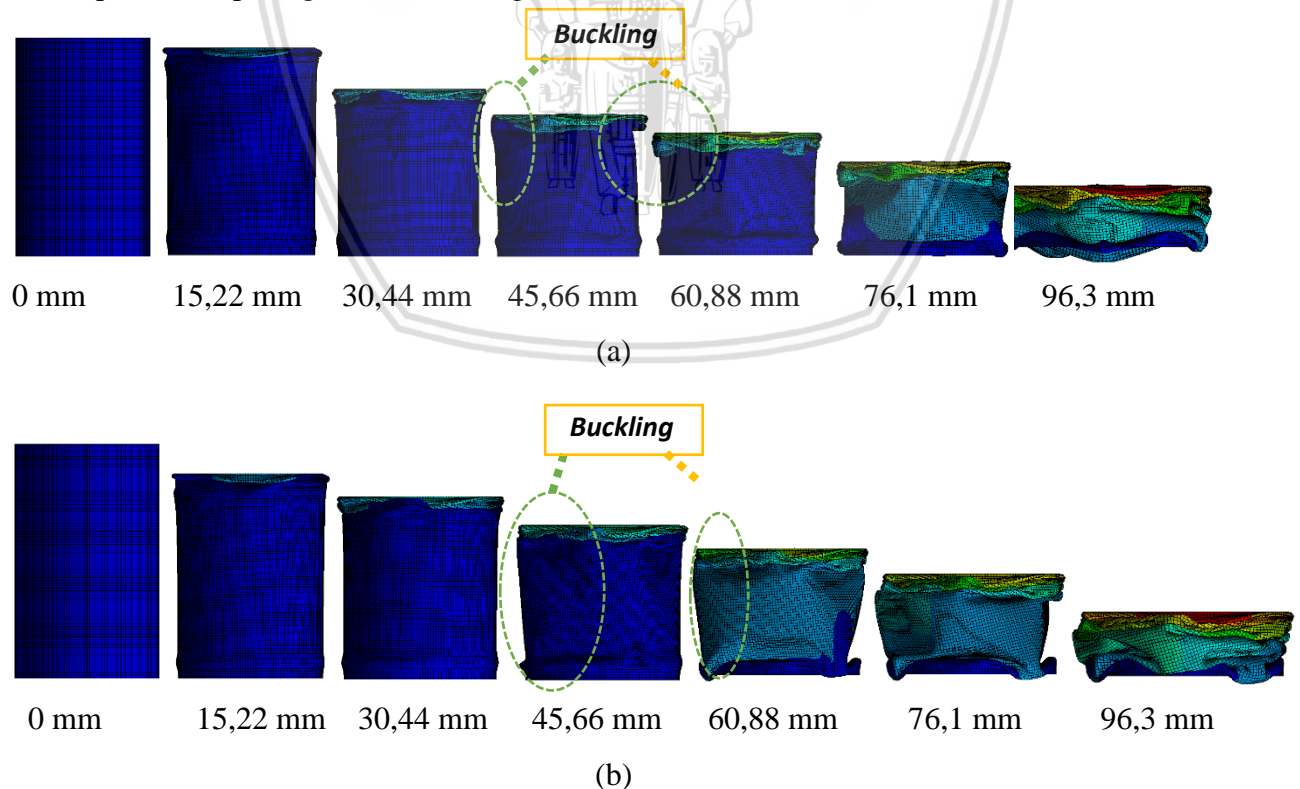
nilai penyerapan energi masing-masing jenis *crash box*, selanjutnya dapat dilihat pada gambar 5.7. Dimana pada gambar tersebut menunjukkan bahwa, penyerapan energi tertinggi dihasilkan pada *crash box* jenis sambungan 1/2 dengan nilai penyerapan energi sebesar 5362,60 joule. Dan *crash box* sambungan 1/3 menghasilkan nilai penyerapan energi kedua dengan nilai sebesar 3182,4 joule. Sementara *crash box* jenis sambungan 1/4 diperoleh hasil penyerapan energi terendah dengan nilai sebesar 3016,1 joule. Sesuai dengan persamaan (2-11) untuk mencari besarnya energi regangan atau usaha, yakni :

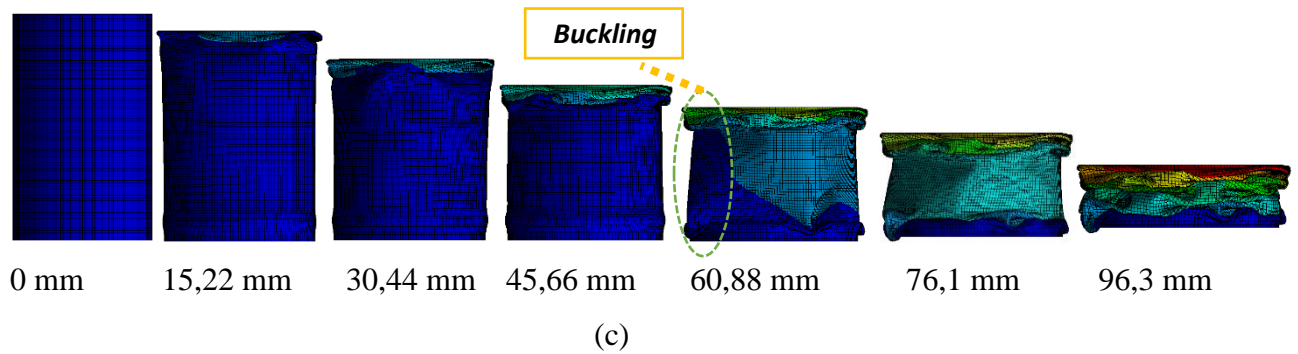
$$U = W = \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta$$

Dimana dari persamaan tersebut diketahui bahwa, nilai energi berbanding lurus dengan nilai *force reaction* (beban). Maka dengan demikian ketentuan berdasarkan pada persamaan tersebut di atas, secara proporsional, telah memenuhi penyerapan energi yang dihasilkan oleh masing-masing jenis *crash box*.

5.6. Pola Deformasi *Crash box* Simulasi

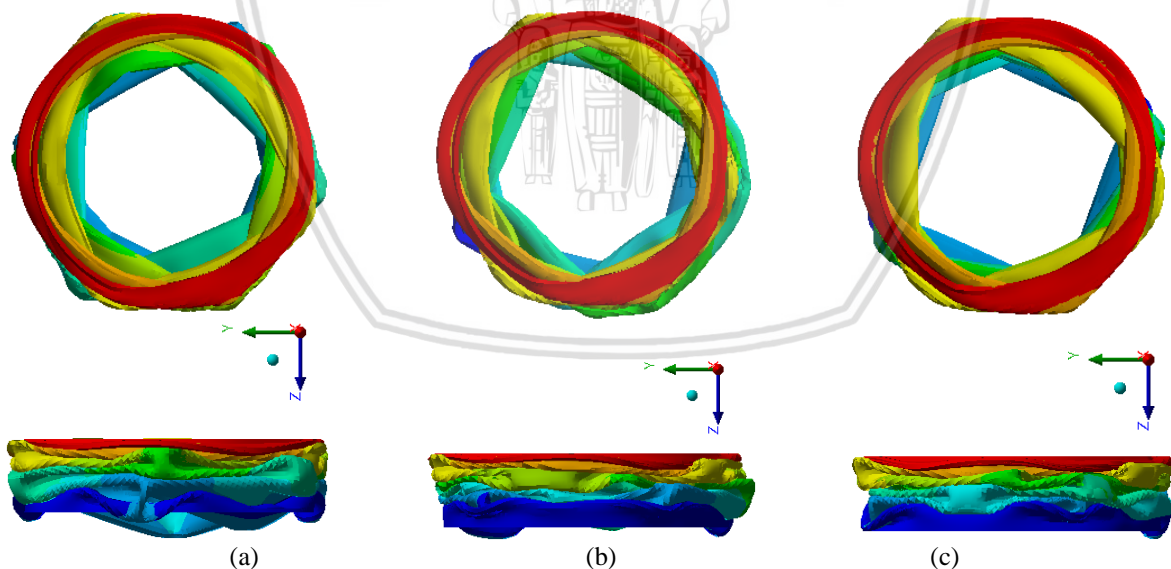
Pola deformasi hasil simulasi komputer dari masing-masing model sambungan *crash box* dapat dilihat pada gambar 5.8 sebagai berikut :





Gambar 5.8 Pola Perubahan Deformasi *Crash box* (a) Sambungan 1/4 (b) Sambungan 1/3 (c) Sambungan 1/2

Pada gambar 5.8 merupakan perubahan deformasi selama *impactor* menekan *crash box* dari masing-masing model *crash box*. Terlihat bahwa, pada *crash box* model sambungan 1/4 dan 1/3 terjadi fenomena *buckling* dan cenderung tidak stabil jika dibandingkan dengan *crash box* pada model sambungan 1/2, dimana deformasinya cenderung lebih stabil. Hal yang menyebabkan penyerapan energi pada *crash box* sambungan 1/2 lebih besar nilainya dari pada model sambungan 1/3 dan sambungan 1/4. Pola deformasi yang terbentuk pada setiap model *crash box* pada *displacement* 96,3 mm diperlihatkan pada gambar 5.9 sebagai berikut :



Gambar 5.9 Pola Deformasi saat *Displacement* 96,3 mm Detik (a) Sambungan 1/4 (b) Sambungan 1/3 (c) Sambungan 1/2.

Gambar 5.9 menunjukkan pola deformasi yang terbentuk untuk masing-masing model sambungan *crash box*. Terlihat bahwa, pola deformasi yang terbentuk pada *displacement* 96,3 mm untuk masing - masing model sambungan *crash box* adalah pola kombinasi antara pola concertina dengan pola diamond yang disebut pula sebagai pola *mixed-mode (axisymmetric-*

diamond). Terlihat bahwa, pada model sambungan 1/4 dan sambungan 1/3 terjadi *buckling*. Hal ini terjadi disebabkan karena salah satu segmennya memiliki struktur kolom panjang. Dibandingkan dengan *crash box* model sambungan 1/2, dimana segmen 1 dan 2 memiliki kolom yang sama sehingga tidak mempunyai struktur kolom panjang, maka dari itu didapatkan deformasi yang cenderung lebih stabil. Hal ini menyebabkan energi penyerapan pada *crash box* model sambungan 1/2 lebih besar daripada model sambungan lainnya.

5.7 Perbandingan Hasil Eksperimen dan Simulasi

Secara umum, perbandingan antara eksperimen dan simulasi berdasarkan pada hasil penelitian yang diperoleh dapat dijelaskan sebagai berikut :

➤ *Force reaction.*

Berdasarkan pada gambar 5.1 dan gambar 5.6 tentang grafik hubungan antara gaya dan deformasi secara garis besar ditunjukkan bahwa, *Folding* pertama terdahulu diawali terjadi pada *crash box* yang salah satu segmennya memiliki kolom panjang yang lebih panjang dari *crash box* lainnya, secara berturut-turut diawali oleh *crash box* sambungan 1/4, disusul kemudian *crash box* sambungan 1/3 dan terakhir adalah *crash box* sambungan 1/2. *Folding* dimana *force reaction/load* tertinggi dihasilkan pada *crash box* sambungan 1/2. Hal ini disebabkan oleh pengaruh segmen 1 maupun segmen 2 memiliki panjang segmen yang sama, sehingga tidak memiliki struktur kolom panjang. Ketika batas akhir segmen 1 memasuki segmen 2, reaksi *crash box* mengalami peningkatan gaya secara drastis seiring dengan terjadinya penambahan ketebalan dinding pada tabung segmen 2. Karena itu, luasan momen inersia mejadi meningkat sehingga untuk membentuk *folding* dibutuhkan beban yang semakin tinggi (sesuai persamaan 2-9). Beban tetinggi terjadi sebesar 176,166 kN dan 180,18 kN pada hasil eksperimen dan simulasi. Akan tetapi, secara umum berdasarkan pada tabel 5.1 ditunjukkan bahwa, *Force reaction* rata-rata diperoleh hasil simulasi lebih besar dari pada hasil eksperimen. Hal ini disebabkan oleh pengaruh kecepatan *impactor*, dimana makin tinggi kecepatan, maka makin besar gaya yang terjadi. Namun, dari angka error yang didapat pada tabel 5.1, nilainya relatif masih kecil dan masih dapat di tolerir. Terkecuali, pada *crash box* jenis sambungan 1/4 terjadi error yang relatif cukup besar, yaitu 27,11 %. Hal ini disebabkan karena pengaruh *buckling* yang terjadi tidak sama dengan *buckling* yang pada umumnya terjadi pada tabung yang berdinding tipis. Akibatnya, berdampak pada meningkatnya *force reaction*.

Tabel 5.1. Data Perbandingan *force reaction* rata-rata hasil simulasi dan eksperimen.

Model	Simulasi <i>Force reaction</i> Rata-rata (kN) a	Eksperimen <i>Force reaction</i> Rata-rata (kN) B	% $c = (a-b)/a \times 100\%$	Ket
CB 1/4	32,26	41,01	27,11	<i>Buckling + Robek + Lapisan tambahan</i>
CB 1/3	33,28	33,02	0,79	<i>Buckling + Robek</i>
CB 1/2	58,64	55,56	5,26	Gejala-gejala <i>buckling</i>

➤ Penyerapan Energi.

Berdasarkan pada gambar 5.2 dan 5.7 tentang penyerapan energi, diperoleh hal yang sama pada *force reaction*. Dimana, nilai penyerapan energi pada hasil simulasi lebih besar dari pada eksperimen. Sesuai dengan persamaan (2-11) bahwa, nilai energi berbanding lurus dengan nilai beban, sehingga semakin besar nilai beban maka semakin besar pula nilai energinya. Maka dari itu, penyerapan energi pada hasil simulasi diperoleh lebih besar dari pada hasil eksperimen. Pada tabel 5.2 dapat dilihat bahwa, perbedaan nilai simulasi (error) sekitar 2,15 – 2,46 % lebih besar daripada nilai eksperimen, terkecuali pada *crash box* sambungan 1/4, terjadi error dengan nilai sebesar 22,39 %. Hal ini terjadi dipengaruhi oleh *force reaction* dari gaya yang diberikan oleh *crash box* sambungan 1/4 yang mengalami *buckling* tidak lazimnya *buckling* yang terjadi pada tabung yang berdinding tipis. Dan akibatnya, berdampak langsung pada nilai penyerapan energi. Hal ini yang menyebabkan nilai penyerapan energi pada *crash box* sambungan 1/4 memiliki nilai yang lebih besar daripada *crash box* sambungan 1/3. Akan tetapi, masih lebih kecil daripada nilai penyerapan energi dari *crash box* sambungan 1/2. Sesuai dugaan awal pada hipotesis, *crash box* sambungan 1/2 merupakan jenis sambungan yang memiliki nilai penyerapan energi tertinggi, yakni 5326,60 J (simulasi) dan 5249,73 J (eksperimen).

Tabel 5.2 Data Perbandingan Penyerapan Energi Hasil Simulasi dan Eksperimen.

Model	Simulasi Energi (J) A	Eksperimen nyata Energi (J) B	% $c = (a-b)/a \times 100\%$	Ket
CB 1/4	3016,10	3886,21	22,39	<i>Buckling + Robek + Lapisan tambahan</i>
CB 1/3	3182,40	3106,03	2,46	<i>Buckling + Robek</i>
CB 1/2	5362,60	5249,73	2,15	Gejala-gejala <i>buckling</i>

➤ Pola Deformasi.

Mengamati gambar 5.3 dan 5.8 tentang pola perubahan deformasi masing-masing jenis *crash box* diperoleh gambaran secara umum bahwa, terjadi perbedaan dimana pada dinding *crash box* hasil eksperimen ketiga-tiganya mengalami robek. Berbeda pada hasil simulasi, tidak diperoleh dinding *crash box* yang mengalami robek apalagi terjadi robek dan selanjutnya membentuk lapisan tambahan seperti yang terjadi pada *crash box* sambungan 1/4 (lihat tabel 5.3). Terjadinya robek pada dinding tabung *crash box* dipengaruhi oleh aluminium yang digunakan sebagai material dari *crash box*. Ukuran diameter yang tidak silindris merupakan faktor utama terjadinya dinding tabung tersebut mudah mengalami robek. Pipa yang sejak dari awal diperoleh dari pasar sudah tidak silindris, diperparah lagi dengan proses pemesinan melalui pengerjaan bubut untuk mendapatkan tebal dinding yang direncanakan. Ukuran yang tidak silindris menyebabkan tebal dinding tabung tidak merata dan akibatnya terjadi ukuran yang bersifat tebal-tipis. Pengaruh selain tebal dinding tidak merata, sudut *chamfer* pun pada *crash box* turut mempengaruhi dinding tabung tersebut dapat mengalami robek, tingkat kekakuan merupakan salah satu penyebabnya. Dimana makin tinggi sudut *chamfer*nya makin kaku tabung tersebut sehingga mudah akan terjadinya robek (dimensi hasil bubutan dapat dilihat pada tabel 4.6). Hal yang membedakan pada simulasi, bahan dan dimensinya homogen dan silindris (dimensi yang disimulasi dapat dilihat pada gambar 4.2), sehingga sangat ideal jika dibandingkan dengan eksperimen.

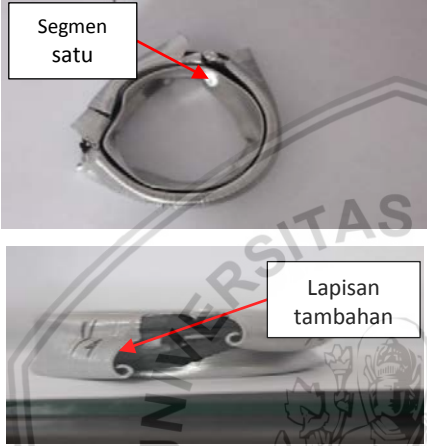
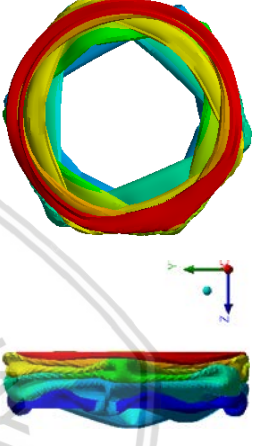

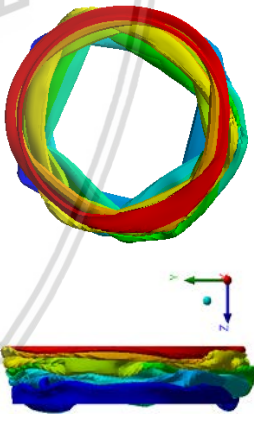

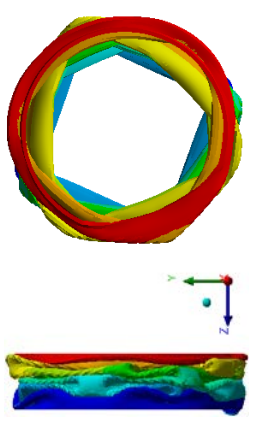
Berdasarkan pengamatan langsung kepada objek maupun melalui hasil rekaman video pengujian teramati bahwa, sebelum terjadi *folding* pada *crash box* terlebih dahulu mengalami gejala-gejala *buckling* (lendutan). Hal ini terjadi pada penyerapan energi fase ke dua, yaitu pada saat batas akhir tabung segmen 1 memasuki tabung segmen 2. *Folding* pertama terlebih dahulu dialami oleh *crash box* sambungan 1/4, ditandai dengan terjadinya lipatan pada ujung atas tabung segmen 2 pada menit ke 1,59, yang disertai dengan robeknya dinding tabung tersebut pada menit ke 2,39 dan pada akhirnya membentuk lapisan tambahan hingga menyentuh dasar tumpuan *crash box* pada menit ke 4,53. Selanjutnya, pada *crash box* sambungan 1/3, pertama kali mengalami *folding* pada menit ke 2,14, ditandai dengan terjadinya lipatan yang menyerupai lipatan concertina dan terjadi pada bagian tengah tabung segmen 2. Dinding tabung kemudian mengalami robek bertepatan pada lipatan tersebut dan terjadi pada menit ke 2,34. Dan terakhir *crash box* sambungan 1/2, batas akhir segmen 1 memasuki segmen 2 terjadi pada menit ke 8,34, gejala-gejala *buckling* ditandai dengan terjadinya lendutan pada tabung segmen 2 terjadi dimulai pada menit ke 9,00 dan

berlangsung hingga pada akhir pembebanan pada menit ke 10,53. Robek yang dialami pada dinding *crash box* terjadi pada menit ke 10,31.

5.8 Perbandingan Pola Deformasi Hasil Eksperimen Nyata dan Simulasi

Perbandingan pola deformasi yang terbentuk dari hasil eksperimen nyata dan simulasi pada tiap model sambungan *crash box* dapat dilihat pada tabel 5.3.

Tabel 5.3 Perbandingan Pola Deformasi Hasil Eksperimen Dan Simulasi

Model	Pola Deformasi Eksperimen	Pola Deformasi Simulasi
CB 1/4		
CB 1/3		
CB 1/2		

Mengamati pola deformasi yang terbentuk pada tiap model sambungan berdasarkan simulasi komputer diperoleh pola yang terbentuk adalah pola *mixed mode*. Hal ini disebabkan karena masing-masing model sambungan mengalami *buckling*, dimana pada daerah awal mula terjadinya *buckling* terbentuk sudut-sudut menyebabkan terbentuknya *diamond*. Jika dibandingkan dengan pola deformasi yang terbentuk pada eksperimen nyata, diperoleh pola deformasi yang cenderung menyerupai pola deformasi pada simulasi komputer. Hal yang agak berbeda diperoleh pada *crash box* model sambungan 1/4 dari hasil eksperimen nyata, disebabkan oleh pengaruh *buckling* dan selanjutnya dinding tabung segmen 2 mengalami robek dan membentuk lapisan tambahan pada bagian luar dinding *crash box* segmen 2. Karena itu diperoleh pola tak terdefinisikan (menurut pola dalam teori tabung berdinding tipis, Toksoy, 2009) dan berbeda dengan pola dari hasil simulasi yang dihasilkan. Akan tetapi secara umum, pola deformasi yang dihasilkan untuk setiap model sambungan *crash box*, baik melalui hasil eksperimen nyata maupun melalui simulasi komputer diperoleh pola yang sama yaitu, membentuk pola kombinasi antara pola concertina dan diamond atau disebut pula pola *mixed-mode (axisymmetric-diamond)*.

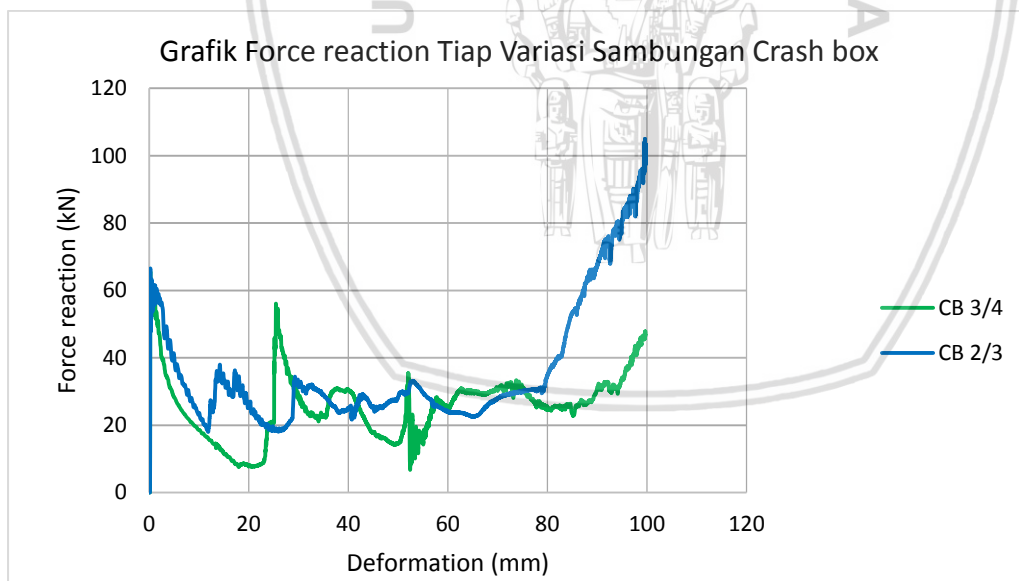
5.9 Hasil Simulasi *Crash box* Sambungan 2/3 dan 3/4

Melanjutkan untuk mempelajari lebih saksama tentang fenomena buckling yang terjadi khususnya pada *crash box* yang salah satu segmennya memiliki kolom panjang, maka pada penulisan berikutnya akan diberikan hasil simulasi untuk *crash box* jenis sambungan 2/3 dan 3/4. Merupakan kebalikan sekaligus tambahan dari jenis model yang telah di variasikan dan telah diuji sebelumnya melalui eksperimen nyata maupun semu. Penambahan materi ditujukan untuk mendapatkan perbandingan antara *crash box* sambungan 1/3 - 2/3 dan sambungan 1/4 - 3/4, walaupun hanya dalam hasil simulasi saja, tanpa eksperimen nyata. Metode dan asumsi yang digunakan adalah sama pada simulasi sebelumnya (lihat Bab 4.6).

➤ *Force reaction*

Pada gambar 5.10 dapat dilihat hasil simulasi grafik hubungan antara *force reaction* terhadap *deformation*. Pada grafik tersebut kelihatan bahwa, di awal pembebanan dimana segmen 1 untuk memasuki area segmen 2, dibutuhkan *force reaction* sebesar 63,048-63,388 kN, pada *deformation* 0,196 mm. Selanjutnya, terjadi penyerapan energi pada tahap dimana disebut sebagai fase pertama dengan melalui proses gesekan antara tabung segmen 1 dan segmen 2. Sepanjang terjadi gesekan, *force reaction* menurun hingga batas akhir segmen 1 memasuki segmen 2. Dan *force reaction* kembali meningkat ketika terjadi *folding* pada *crash*

box. *Folding* pertama terjadi terlebih dahulu dialami oleh *crash box* jenis sambungan 2/3 dengan *force reaction* sebesar 34,943 kN pada *deformation* 17,429 mm. *Force reaction* tertinggi terjadi dengan nilai 102,147 kN, dan pada *deformation* 99,524 mm. Sementara, pada *crash box* sambungan 3/4, *force reaction* tertinggi terjadi pada *folding* pertama dengan *force reaction* sebesar 53,659 kN pada nilai *deformation* sebesar 25,430 mm. *Force reaction* rata-rata yang nilainya lebih besar dihasilkan adalah *crash box* pada sambungan 2/3 dengan nilai rata-rata sebesar 35,979 kN, lebih besar dari nilai *force reaction* rata-rata yang dihasilkan dari *crash box* sambungan 3/4 yakni 25,693 kN. Trend yang sama diperoleh pada *crash box* jenis sambungan 1/3 dan 1/4 pada simulasi sebelumnya, dimana *force reaction* rata-rata diperoleh lebih besar pada *crash box* sambungan 1/3 – 2/3 daripada *crash box* sambungan 1/4 – 3/4. Hal ini disebabkan oleh pengaruh kolom panjang pada *crash box*. Dimana *crash box* sambungan 1/4 – 3/4 adalah *crash box* yang salah satu segmennya merupakan kolom panjang, lebih panjang daripada salah satu segmen kolom panjang yang dimiliki oleh *crash box* sambungan 1/3 – 2/3. Hal ini sesuai dengan persamaan (2-9) dari Euler. Dimana, panjang kolom (L) berbanding terbalik dengan beban kritisnya (P). Kolom yang semakin panjang menyebabkan nilai beban kritisnya semakin rendah.

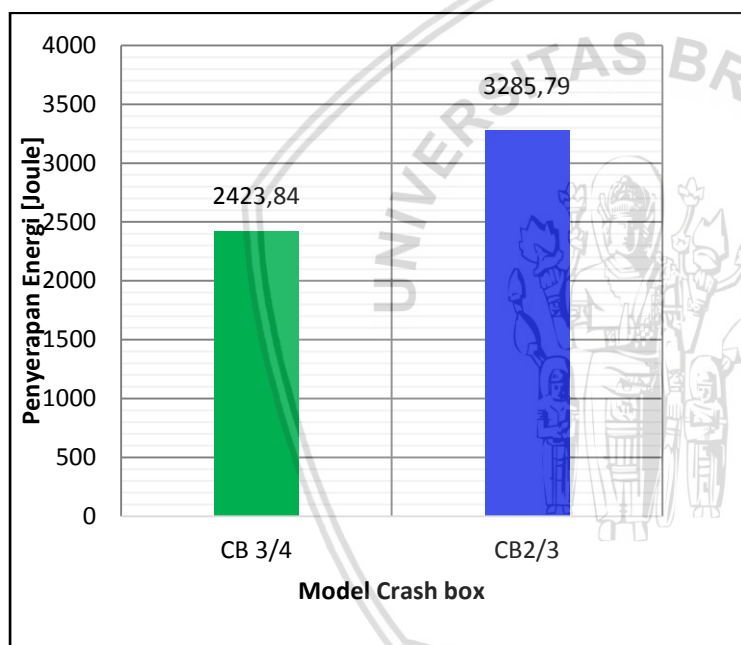


Gambar 5.10 *Force reaction* terhadap *deformation crash box* sambungan 2/3 dan 3/4

➤ Penyerapan energi

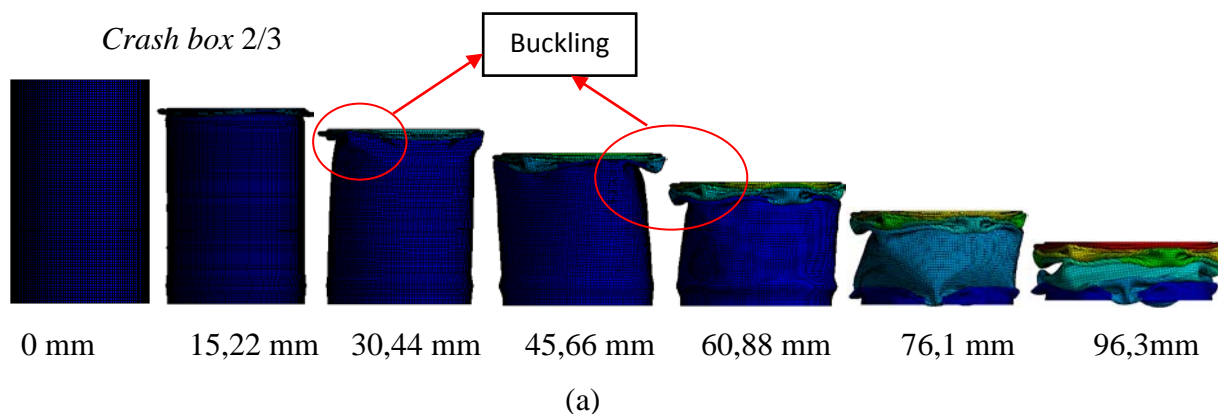
Besarnya penyerapan energi dipengaruhi oleh besarnya *force reaction* yang terjadi pada reaksi *crash box* untuk menerima beban. Beban yang semakin besar akan semakin besar pula kemampuan *crash box* untuk menyerap energi. Hal ini sesuai dengan persamaan (2-11)

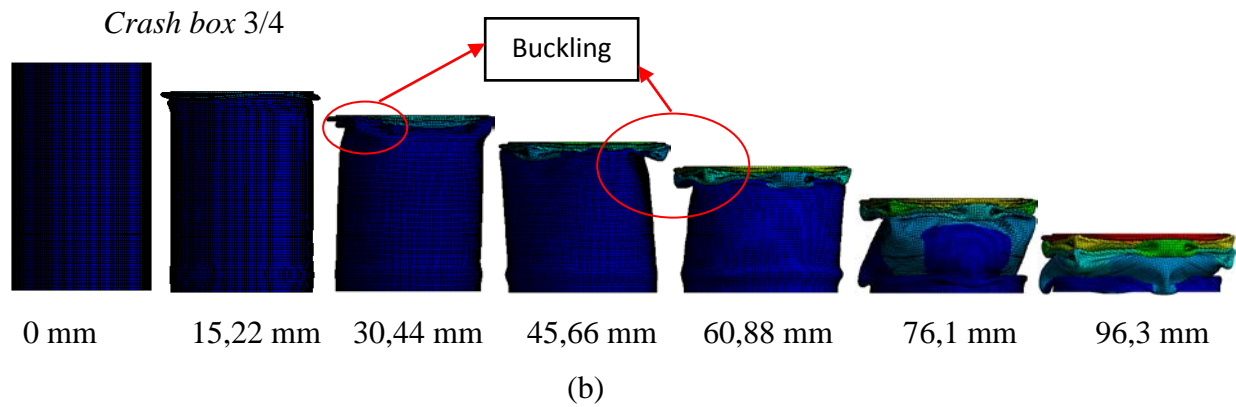
dimana beban berbanding lurus dengan usaha (U) oleh *crash box* untuk menyerap energi. Hal ini tercermin pada gambar 5.11. Penyerapan energi tertinggi diperoleh pada *crash box* yang *force reaction* rata-ratanya memiliki nilai tertinggi, yaitu *crash box* sambungan 2/3 dengan nilai sebesar 3285,79 joule, lebih besar 3,15 % dari *crash box* sambungan 1/3 dengan nilai penyerapan energi diperoleh pada simulasi sebelumnya (lihat gambar 5.7) adalah 3182,40 joule. Dibandingkan antara *crash box* sambungan 3/4 dengan sambungan 2/3 nilai penyerapan energi sambungan 3/4 diperoleh lebih kecil yaitu, 2423,84 joule. Akan tetapi dengan panjang segmen yang sama 3/4 – 1/4, nilainya berbeda cukup signifikan, yaitu 3016,1 joule. Hal ini terjadi disebabkan karena pengaruh *crash box* sambungan 1/4 memiliki *force reaction* rata-rata lebih tinggi (41,01 kN) dibandingkan dengan *crash box* sambungan 3/4 (25,693 kN).



Gambar 5.11 Penyerapan Energi pada *Crash box* Sambungan 2/3 dan sambungan 3/4.

➤ Pola deformasi

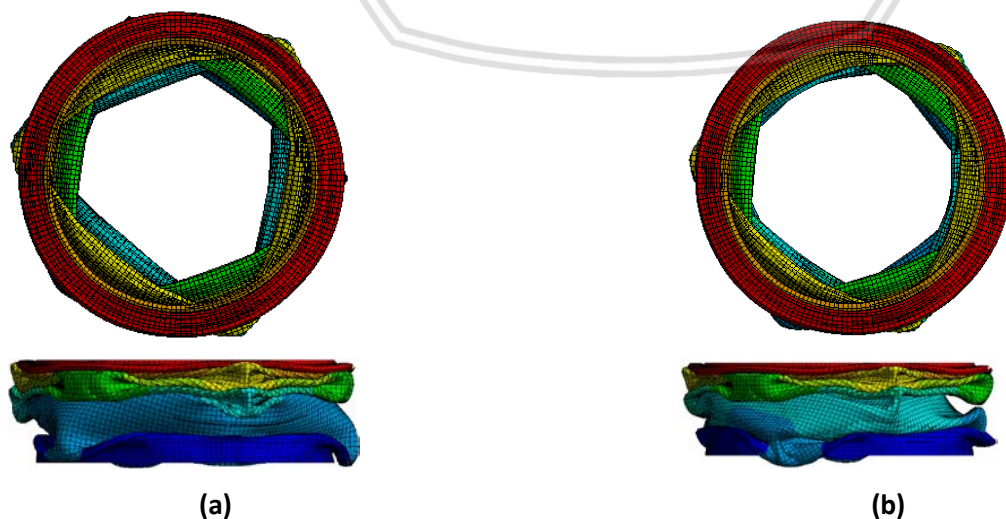




Gambar 5.12 Pola Deformasi *Crash box* (a) Sambungan 2/3 (b) Sambungan 3/4

Mengamati perilaku pola deformasi yang dihasilkan pada *crash box* yang segmennya memiliki panjang yang sama yaitu sambungan $3/4 - 1/4$ dan $2/3 - 1/3$, dapat dilihat pada gambar 5.11 (a) – 5.11 (b) dan 5.8 (a) – 5.8 (b). Pada gambar tersebut kelihatan bahwa, pola deformasi diperoleh hasil yang sama dimana gejala-gejala *buckling* tersebut terjadi diawali dari atas struktur merembet hingga ke bawah sampai akhirnya terbentuk pola deformasi yang lebih cenderung menyerupai pola *diamond*. Teramati bahwa, gejala-gejala *buckling* tersebut, kesemuanya terjadi sejak pada deformasi 30,44 mm.

Secara umum, perbandingan *crash box* yang segmennya memiliki panjang yang sama, yakni $2/3 - 1/3$ dan $3/4 - 1/4$ diperoleh bahwa, *crash box* yang memiliki kolom panjang lebih panjang dari kolom panjang yang dimiliki oleh *crash box* lainnya, kecenderungannya memiliki nilai yang lebih rendah. Hal ini dapat dilihat pada *force reaction* maupun pada kemampuan untuk menyerap energi. Hal yang sama pula diperoleh pada perilaku pola deformasi, dimana gejala-gejala *buckling* terjadi sejak deformasi pada 30,44 mm.



Gambar 5.13 Pola Deformasi Tampak depan dan Atas pada Deformasi 96,3 mm.(a) Sambungan 3/4 (b) Sambungan 2/3

Gejala *buckling* dialami oleh *crash box* teramati makin lama terdeformasi, semakin tidak stabil pergerakannya, hingga pada akhirnya membentuk sudut-sudut sepanjang struktur sebagai akibat *buckling* yang terjadi pada tabung *crash box*. Salah satu hal yang menyebabkan kecenderungan terbentuknya pola yang menyerupai pola *diamond*, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 5.13.





Halaman ini sengaja di kosongkan

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil penelitian tersebut di atas dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pengaruh sambungan segmen pada *crash box* sangat tergantung pada struktur kolomnya. Salah satu segmen dengan struktur kolom panjang lebih cenderung akan mengalami *buckling* sehingga beban kritisnya menurun dan akibatnya, kemampuannya untuk menyerap energi tidak optimal. Hal ini diperoleh pada *crash box* model sambungan 1/3 dan sambungan 1/4, dimana kedua model sambungan tersebut mengalami *buckling*, berbeda dengan *crash box* sambungan model 1/2, deformasinya cenderung lebih stabil, karena itu penyerapan energinya lebih besar daripada sambungan 1/3 dan sambungan 1/4.
2. *Crash box* pada model sambungan 1/2 mempunyai nilai penyerapan energi tertinggi sebesar 5249,726 J. Dan *crash box* pada model sambungan 1/3 mempunyai nilai penyerapan energi terendah yaitu 3106,027 J, lebih rendah dari nilai penyerapan energi dari *crash box* model sambungan 1/4 sebesar 3886,238 J. Hal ini terjadi karena nilai penyerapan energi pada *crash box* dipengaruhi oleh *force reaction* dari gaya yang diberikan oleh *crash box* sebagai reaksi untuk menahan beban.
3. Pola deformasi dihasilkan cenderung menyerupai pola deformasi yang berbentuk *mixed-mode*, terkecuali pada *crash box* model sambungan 1/4.

6.2 Saran

Saran yang dapat diberikan sehubungan dengan penelitian ini, antara lain :

1. Pengembangan penelitian perlu dilakukan dengan variasi material antara segmen 1 dan segmen 2 pada posisi sambungan yang berbeda dengan penelitian sebelumnya.
2. Untuk mendapatkan penyerapan energi yang lebih optimal, struktur kolom pendek merupakan alternatif terbaik untuk menghindari terjadinya *buckling* pada *crash box* sambungan multi segmen.
3. Untuk mendapatkan gambar deformasi yang lebih teliti, disarankan untuk menempatkan kamera dari segala arah agar proses *buckling* dan kemungkinan dinding tabung *crash box* mengalami robek dapat terlihat dengan jelas.



DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, Zainun. 1999. *Elemen Mesin I*. Bandung : PT Refika Aditama.
- Asroni., Choiron, Moch. Agus., Purnowidodo, Anindito. 2014. *Pengaruh Crash Box berbentuk Tabung 2 segmen terhadap Kemampuan Menyerap Energi Impak dengan Simulasi Komputer* : Jurnal Rekayasa Mesin Vol.5, No.3 Tahun 2014 : 201-207.
- Awali, Jatmiko. 2014. *Pengaruh Variasi Geometri Crash Box 2 segmen Terhadap Kemampuan Menyerap Energi Impak Dengan Simulasi Komputer*. Jurnal. Malang : Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Vol. 5, No.2, Taun 2014 : 113-118, ISSN 0216-468X. 113.
- Badan Pusat Statistik. 2015. *Statistik Transportasi Darat 2014*. Indonesia : Badan Pusat Statistik.
- Bakhtiar, Yusuf. 2015. *Analisis Buckling Terhadap Tabung Plat Tipis Menggunakan Metode Elemen Hingga*, Jurnal. Surakarta : Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah.
- Beer., F.P.et al. 2012. *Mechanics of Materials 6 th Edition*. New York : Mc Graw-Hill.
- Calister., and William. 2001. *Fundamentals of Materials Science and Engineering. Department of Metallurgical Engineering*. New York : Jhon Wiley & Son, Inc.
- Choiron, Moch. Agus., Darmadi, Djarot B, Anwari, Bintang Rahmaddian. 2015. *Analisis Penyerapan Energi Dan Pola Deformasi Crash Box Dengan Variasi Sudut Tirus Dinding Crash Box Pada Uji Simulasi Tabrakan Arah Frontal*. Jurnal. Malang : Jurnal Rekayasa Mesin Vol. 6, No 1 Tahun 2015 : 75-83.
- Choiron, Moch. Agus., Purnowidodo, Anindito., Siswanto, Eko., Hidayati, Nafisah Arina. 2016. *Crash Energy Absorption Of Multi-Segments Crash Box Under Frontal Load*, Jurnal. Malang, Indonesia : *Mechanical Engineering Department, Brawijaya University* : Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) 78:5 (2016) 347-350.
- Choiron, Moch. Agus., and Sudjito. 2016. *Simulation Of Two Segmens Crash Box Subjected To Frontal Load*, Jurnal. Indonesia : *Mechanical EGINEERING Depertment Of Brawijaya University : ARPN Journal Of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11, No. 2, January 2016.
- Choiron, Moch. Agus, Sudjito and Hidayati, Nafisah Arina. 2016. *Crash Absorption Of Two-Segment Crash Box with Holes under Frontal Load*. Jurnal. Indonesia : *Mechanical Engineering Dept. Of Brawijaya University*.
- Dishong., 2003. *Pokok Teknologi Struktur Untuk Konstruksi dan Arsitektur*. Departemen Of Construction Management Louisiana State University.
- Desetywan. Wordpress.com. *Analisa Buckling atau Tekukan* : www.google.co.id
- Fauzan, Ilman. 2015. *Analisis Pola Deformasi dan Energi Penyerapan Pada Initial Fold Crash Box Menggunakan Metode Frontal Crash Test*. Malang : Jurnal Rekayasa Mesin.

Gere, James. M. 2004. *Mechanics of Materials*, 6 th Editon. New York : Thomson Learning, Inc.

Kissel, J. R., Ferry, R.L. 2002. *Alumunium Structure A Guide to Their Spesification and Design Second Edition*. New York : John Wiley & Sons Inc.

Kusyairi, Imam., Choiron, Moch. Agus., Purnowidodo, Anindito. 2015. *Pengaruh Variasi Crash Box Pola Origami Terhadap Kemampuan Penyerapan Energi*. Jurnal. Malang: Jurnal Rekayasa Mesin Vol. 8 No. 2 (2015).

Mayachristin.lecture.ub.ac.id, 2013/05.

Nasir Hussain, N., et al. 2017. *Comparative Study of Trigger Configuration for Enhacement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading*. Department of Mechanical Engineering BITS Pilani, Hyderabad Campus, Telangana state.

Paul, P. Et al.. 2004. *Vehicle Crashworhthiness and Occupant Protection*. Michigan : American Iron and Stell Institute.

Putra, I Putu Ali. 2014. *Mengenal Sistem Keselamatan Pada Mobil*. Indonesia : M. Compasiana. Com.

Sohn, S.M. et al. 2007. *Evaluation of The Crash Energy Absorption of Hydroformed Bumper Stays*. Journal of Material Processing Technology 187 : 283-286

Sumitomo. 2005. *Sumitomo Metals and Toyota Iron Works Co. Ltd : New Mazda Incorporates High – Efficiency Crash Box from Sumitomo Metals*. Japan : Azom

Surdia., dkk. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta : PT Pradnya Paramita.

Tanaskovic, J., Milkovic, D., Lucanin, V., Vasic Franklin. 2014. *Experimental Investigations Of The Shrinking – Splitting Tube Collision Energy Absorber, Journal Thin – Walled Structures*. University of Belgrade, faculty of Mechanical Engineering, kralije, marije 16, belgrade, Serbia.

Toksoy, A.K. 2009. *Optimization of The Axial Crushing Behavior of Closed-Cell Alumunium Foam Filled Welded 1050 Al Square-Cross Section Crash Boxes*. Thesis. Izmir : Izmir Institute of Technology.

Velmurugan., and Muralikanan. 2009. *Energy Absorption Characteristics of Annealed Steel Tubes Of various Cross Sections in Static And Dynamic Loading*. Latin American Journal Of Solids And Structutres, Volume. 6, 2009 : 385 – 412.

Wiryosumarto, H dan Okumura, T. 2000. *Teknik Pengelasan Logam* : PT. Pradnya Paramita.

<https://www.indiamart.com/universaltesting-machine-kolkata/universal-testing-machines.html>.

<http://home.iitk.ac.in/sangals/virtualLab/mechanicalTestingExperiments/engineeringCurve.html>.